Reinhard Breuer
Chefredakteur

Wer schützt uns vor Impfverweigerern?

Seit einigen Jahren lasse ich mich jeden Herbst gegen Grippe impfen. Seitdem sind meine Krankentage praktisch auf null zurückgegangen. Denn merkwürdigerweise habe ich auch weniger unter simplen Erkältungen zu leiden, obwohl eine Influenza-Impfung ja gegen eine Bakterieninvasion machtlos sein sollte.

Neben dem Vorzug, nicht jedes Jahr wieder ächzend und schwitzend im Bett liegen zu müssen, hat mich auch die Statistik zur Impftreue bekehrt. Jährlich sterben allein in Deutschland 5000 bis 8000 Menschen an Influenza. Das ist ein Skandal: Fast alle hätten mit einer Impfung überleben können (außer einer kleinen Zahl von so genannten Impfversagern). Wer sich nicht impft, gefährdet rücksichtslos sich und andere. Auch Menschen, die trotz einer Infektion keine Krankheitssymptome zeigen, können das Virus übertragen.

Generell gilt: Die Impfbereitschaft der Bevölkerung sinkt seit Jahren. Etwa vierzig Prozent der Erwachsenen in Deutschland haben heute keinen ausreichenden allgemeinen Impfschutz mehr. Beigetragen dazu haben auch Ärzte, die vor Nebenwirkungen warnten. Dabei ist die Sicherheit heutiger Impfstoffe dank aufwendiger Untersuchungen auf Nebenwirkungen exzellent – ja sogar besser als bei manchen Medikamenten, da Impfstoffe ja nur gesunden Menschen verabreicht werden.

Die Folge der Impfmüdigkeit ist, dass sich Kinderkrankheiten wie Diphtherie oder Masern bei uns wieder ausbreiten, während zum Beispiel Finnland als erstes Land in Europa die Masern ausgerottet hat. In Deutschland bekommen Babys zwar durchweg die erste Masernimpfung, aber die notwendige zweite Impfung im zweiten Lebensjahr erhalten nur mehr ein Drittel aller Kinder – zu wenig, um die Krankheit niederzuhalten.

Auch längst ausgerottete Krankheiten kehren zurück. So galt Europa eigentlich seit zwei Jahren als »poliofrei«. Doch letzten April wurde die Kinderlähmung in Bulgarien bei einem wenige Monate alten Mädchen entdeckt, das nicht geimpft worden war. Aber wirklich bedroht von der Wiederkehr der Kinderlähmung sind Länder wie Indien. Die Weltgesundheitsorganisation WHO wollte denn dort auch den Stier bei den Hörnern packen: Ende Februar führte sie im Norden Indiens »die größte Impfkampagne aller Zeiten gegen Polio« durch. 1,3 Millionen Helfer impften insgesamt 165 Millionen Kinder innerhalb von sechs Tagen in einem Gebiet der Größe Westeuropas.

»Wer sich nicht impft, gefährdet rücksichtslos sich und andere«

Bei uns eröffnen sich andere Fronten. Neuerdings arbeiten Krebsforscher an Impfstoffen, die das Immunsystem gegen Tumorzellen bei bereits Erkrankten mobilisieren. Solche Impfungen gegen Krebs werden derzeit klinisch getestet, sind allerdings noch teuer, kompliziert und vorläufig nur bei wenigen Krebsarten – wie dem malignen Melanom (schwarzen Hautkrebs) oder dem Prostatakrebs – erprobt. Doch wie unser Bericht ab Seite 38 zeigt, könnte es in einigen Jahren für bislang unheilbar Kranke neue Hoffnung geben.

INHALT

FORSCHUNG AKTUELL

10 **Die Königsgrüfte von Qatna**
Grabanlage unter altsyrischem Königspalast birgt aufschlussreiche Schätze

12 **Erstes supraflüssiges Gas erzeugt?**
Weiterer Durchbruch in der Tieftemperaturphysik gelungen

15 **Fliegende Anti-Malaria-Waffen**
Genetisch veränderte Moskitos können Malaria-Erreger nicht mehr übertragen

17 **Bild des Monats**
Brodelnder Gaskessel

SPEKTROGRAMM

46 Nasses Marseis · Lauschangriff mit dem Neuro-Chip · DNA im Reißtest · Blick in die Urzeit des Alls · Wärmesensor der Haie · Rechts vor links auch beim Kuss

THEMEN

20 **25 Jahre Spektrum der Wissenschaft**
Teil IV: Klimaforschung
Welche Faktoren steuern den Wechsel zwischen Kalt- und Warmzeiten?

26 **Das galaktische Zentrum**
Indizienbeweise überführen Schwarzes Loch

38 **TITELTHEMA:**
Immunstrategie gegen Krebs
Abwehrzellen als Waffe

48 **Quanteninformatik**
Das Rechnen mit Quantenbits folgt eigenen Regeln

58 **Verkrüppelte Amphibien**
Parasitische Würmer verursachen zusätzliche Beine

66 **Tödliche Präzision**
GPS-gesteuerte Bomben treffen auf 25 Meter genau

74 **Das berühmteste Molekül der Welt**
Die Entdeckung der DNA-Doppelhelix vor 50 Jahren war nur der Anfang

80 **Technologie-Report: Kraftwerke**
Wenn das Erdöl knapp wird – welche Technik liefert künftig Strom und Wärme?

FORSCHUNG UND GESELLSCHAFT

93 **Maut ohne Mautstation**
Mit Satellitennavigation und Mobilfunk zur Autobahngebühr für Lkw

Titelbild: Mit langen, tentakelartigen Armen fischen die dendritischen Zellen des Immunsystems nach Krankheitserregern. *Bild: Jeff Johnson*

SEITE 20

SERIE »25 JAHRE SPEKTRUM« (IV)

Klarheit über das Klima

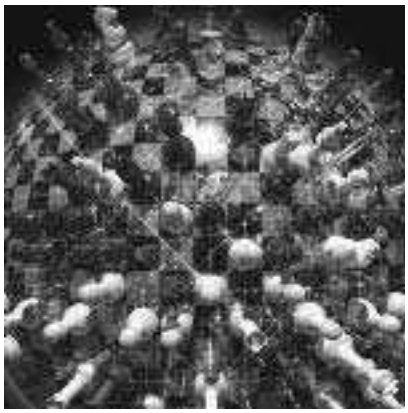
Vor 25 Jahren bestätigte sich, dass die großen Vereisungen der Erdgeschichte mit Schwankungen der Erdbahn um die Sonne zusammenhängen. Zugleich begann die Debatte um die Rolle der Treibhausgase. Doch auch die Ozeane können das Klima kippen lassen.

SEITE 26

ASTRONOMIE

Das Zentrum der Milchstraße

Inmitten unserer Galaxis lauert ein Schwarzes Loch auf neue Materie-Nahrung. Modernste Beobachtungstechniken verraten nicht nur das Vorhandensein dieses Massemonsters, sondern geben zugleich auch Einblick in die Verwandschaft verschiedener Galaxientypen.



SEITE 48

QUANTENINFORMATIK

Spielregeln für Quantencomuputer

Künftige Quantenrechner werden mit komplexen Überlagerungen von Bits arbeiten. Exotische Phänomene wie Verschränkung und Teleportation ermöglichen ungeahnte Rechenleistung.

SEITE 58

UMWELTSCHÄDEN

Verstümmelt durch Gülle

Menschlicher Einfluss dürfte die Hauptschuld daran tragen, dass weltweit die Amphibien vom Aussterben bedroht sind. Überdüngung trägt dazu bei, dass auch Missbildungen in den letzten Jahren überhand nehmen.

TITELTHEMA: IMMUNOLOGIE

Impfen gegen Krebs

SEITE 38

Sie sind selten und doch unverzichtbar: die dendritischen Zellen. Erst seit kurzem beginnen Wissenschaftler ihre zentrale Rolle bei der Immunabwehr genauer zu verstehen.

SEITE 66

WAFFENTECHNIK

Satellitengelenkte Waffen

Extrem treffsichere und zugleich kostengünstige Angriffsflugkörper wurden in Afghanistan erstmals eingesetzt.

SEITE 74

MOLEKULARBIOLOGIE

50 Jahre Doppelhelix

Zwei umeinander gewundene Molekülstränge mit Reißverschlusszähnen: Das Doppelhelix-Modell der DNA ist zum Logo einer ganzen Wissenschaft geworden. James D. Watson, einer der Entdecker, nimmt dazu in einem Interview Stellung.

TECHNOLOGIE-REPORT

SEITE 80

Kraftwerke der Zukunft

Stehen demnächst Brennstoffzellen im Supermarktregal, wie es ein Werbespot suggeriert? Oder wird die Atomlobby am Ende Recht behalten, und nur deutsche Reaktortechnik bewahrt uns vor Treibhauseffekt und künftiger Ölkrise?

95 Fischstäbchen im Aus
Deutschlands Speisefisch Nummer eins, der Kabeljau, ist vom Aussterben bedroht

96 »Es muss sich wieder ein natürliches Räuber-Beute-System einstellen«
Interview mit dem Fischereibiologen Dietrich Schnack

Kommentare
97 Selbstzensur der Fachjournale
103 Trapez oder Rechteck?

REZENSIONEN

104 Kaspar Hausers Geschwister
von P. J. Blumenthal
Am Tor zur Hölle von John Medina
Von Natur aus anders von Doris Bischof-Köhler

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

112 Flöhe, Käfer und Leichtathleten

WEITERE RUBRIKEN

3 Editorial: Schutz vor Impfverweigerern?
6 Leserbriefe
7 Impressum
57 Im Rückblick: Peking-Menschen, Flugboote u. a.
64 Wissenschaft im Alltag
Wetterbeobachtung mit Radar
98 Wissenschaft in Unternehmen
Mit Ultraschall gegen Krebs
108 Preisrätsel
110 Wissenschaft im Internet
Vulkanausbrüche
115 Stellenmarkt: Lehre und Forschung
118 Vorschau

SPEKTRUM-PLUS.DE
ZUSATZANGEBOT NUR FÜR ABONNENTEN

Kunst im Morgenlicht der Menschheit

Schon vor Zehntausenden von Jahren schufen Menschen beeindruckende Bildwerke an den Wänden von Höhlen und Felsdächern. Die Anfänge dieser Fertigkeit erscheinen heute rätselhafter denn je.

ZUGÄNGLICH ÜBER WWW.SPEKTRUM-PLUS.DE
NACH ANMELDUNG MIT ANGABE DER KUNDENNUMMER

Warum gibt es Großmütter?

Januar 2003

Begrenzte Zeit der Fruchtbarkeit

In diesem Artikel erwähnten Sie, es sei nicht erforscht, weshalb Frauen in der zweiten Lebensmitte unfruchtbar, während Männer bis ins hohe Alter zeugungsfähig seien. Die meisten Menschen jenseits der fünfzig sind physisch schlicht nicht mehr in der Lage, 24 Stunden ununterbrochen für ihre »Brut« da zu sein. Im Tierreich gibt's schon gar keine alten Mütter! Fragen Sie Väter von früher oder heutige alte Väter über siebzig, die sich laut Yellow Press »rührend um ihren Nachwuchs kümmern«, wer denn die Süßen versorgt, wenn sie zahnen, krank, frech oder trotzig sind: Es sind die jungen Frauen der alten Väter, unverbrauchte, nervenstarke Mütter. Die Väter haben dann nämlich umgehend anderes zu tun.

Vor etwa fünf Jahren wurde einer sechzigjährigen Italienerin auf eigenen Wunsch ein befruchtetes Ei eingepflanzt; der gesunde Junge, den sie gebar, ist heute fünf oder sechs Jahre alt. Die Mutter – heute über 65 – gibt zu Protokoll, dass es ihr eigentlich viel zu viel sei, sie wird mit ihm nicht mehr fertig.

Großmütter unterstützen junge Familien, entlasten sie sporadisch oder in Notlagen, weil auch sie Verantwortung für Kinder kennen. Sie geben Erfahrungen an die nächste Generation weiter, denn die eigene »Brutphase« ist gottlob vorbei.

Marlies Fergenbauer, Frankfurt/Main

Hans Thoma malte im Jahr 1844 diese sich liebevoll um ihre Enkelin kümmernde Großmutter.

STÄDTISCHE GALERIE IM STÄDELSCHEN KUNSTINSTITUT FRANKFURT / URSULA EDELMANN

Mutter und Schwiegermutter im Spannungsfeld

Die Problematik »Schwiegertochter–Schwiegermutter« ist vermutlich einfacher gestrickt, als dies die Autoren darlegen. Die Tochter weist das Verhaltensmuster ihrer Mutter auf, d. h. sie vollzieht viele Handlungen etwas anders als die Schwiegermutter. Nun haben die meisten Menschen ein natürliches Problem damit, dass etwas anders läuft, als sie es für richtig halten, beziehungsweise sich von anderen in Handlungen hineinreden zu lassen, die sie gewohnt sind und in Ordnung finden.

Daraus ergibt sich ein natürliches Spannungsfeld zwischen den Akteurinnen, deren Stress sich in der Statistik der Autoren widerspiegelt. Allerdings dürfte sich das Spannungsfeld in den meisten Fällen im Laufe der Zeit abbauen, wobei Katalysatoren wie kleine Kinder nur positiv wirken können. Das sollte auch die Statistik zeigen: Der negative Effekt der Mutter des Vaters sollte beim ersten Kind besonders stark ausgeprägt sein und dann relativ schnell abnehmen.

Dr. Gilbert Brands, Krummhörn

Antwort des Autors Jan Beise:

Auch wir gehen von einem Spannungsfeld zwischen der Schwiegermutter und -tochter aus. Wir führen jedoch darüber hinaus noch an, worin diese Interessenunterschiede bestanden haben könnten. Dass beide Parteien unterschiedliche (genetische) Interessen haben, ist evolutionstheoretisch ein Faktum. Weiterhin sind das Phänomen der Vaterschaftsunsicherheit und ihre Konsequenzen im Verhaltenskontext bekannt und gut untersucht. Der spekulative Teil liegt in der Annahme, dass diese Interessenunterschiede unmittelbar für die differenzielle Kindersterblichkeit verantwortlich sind. Diese direkte Kausalität nachzuweisen ist theoretisch möglich, aber schwieriger, und erfordert einen anderen empirischen Ansatz.

Was Ihre Vermutung, dass der negative Effekt vom Geburtsrang abhängig sein sollte, betrifft, so fanden wir tatsächlich einen erhöhten Effekt für das erste Kind. Doch der Unterschied ist nicht besonders deutlich – und er wird auch nicht zunehmend geringer.

Der *Homo oeconomicus* auf dem Prüfstand

Forschung aktuell, Dezember 2002

In dem hier beschriebenen Experiment von Kahneman und Tversky wird den Versuchspersonen die Auswahl zwischen sicheren 80 Dollar und einem Glücksspiel mit einem Erwartungswert der Auszahlung von 85 Dollar angeboten.

Erwartungswerte werden mittels Wahrscheinlichkeiten berechnet, also den Grenzwerten relativer Häufigkeiten für den Fall, dass die Anzahl der Spiele gegen unendlich geht. Da aus Sicht der Versuchspersonen nur eine einzige Chance gegeben war, ist der Erwartungswert nicht aussagekräftig. In solchen Situationen ist es das Sinnvollste, aus allen sicheren Alternativen die beste zu wählen. Die Entscheidung für die 80 Dollar ist daher nicht irrational, sondern wirtschaftlich vernünftig.

Harald Meissner, Berlin

Antwort:

Nach Überzeugung der Statistiker ist der Erwartungswert selbst dann die maßgebende Größe, wenn es um eine nur einmal zu spielende Lotterie geht. Man kann das damit begründen, dass einem im Laufe des Lebens viele Entscheidungssituationen mit unsicherem Ausgang begegnen; der Erwartungswert der Gesamtauszahlung aus all diesen »Lotterien« wird der Summe der Einzel-Erwartungswerte zumindest nahe kommen. Es macht keinen grundsätzlichen Unterschied, ob es lauter verschiedene Lotterien sind oder immer dieselbe. In jedem Fall kommt derjenige am besten weg, der sich in jedem Einzelfall so verhält, dass der Erwartungswert der Auszahlung maximal wird.

Die Redaktion

Briefe an die Redaktion …

… richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg

E-Mail: wessels@spektrum.com
Fax: (0 62 21) 91 26 -729

MONTANUNIVERSITÄT LEOBEN

Die spitzen Hohlzähne des Ringelwurms *Glycera dibranchiata* enthalten einen hohen Anteil an Kupfer in Form von Atacamit.

Kupfergehärteter Zahn

Spektrogramm, Dezember 2002

Lebensnotwendiges Kupfer

In diesem Beitrag wird Kupfer als »toxisches Schwermetall« bezeichnet und in der Folge die Frage aufgeworfen, wie besagter Wurm sich vor einer Vergiftung schützt. Dazu ist zu sagen, dass Kupfer ein essenzielles Element ist. So hat der erwachsene Mensch laut WHO einen täglichen Bedarf von etwa zwei Milligramm. Kupfer findet sich in einer Vielzahl von verschiedenen Proteinen und Enzymen auch bei vielen Tieren wieder.

Die Aufnahme und Verarbeitung von Kupfer ist tägliches Geschäft vieler Lebewesen und die Toxizität von Kupfer entsprechend gering. Da der vorgestellte Organismus das Metall sogar zu seinen Zwecken noch anreichern muss, ist in diesem Zusammenhang die Bezeichnung als toxisch nicht angemessen, meiner Ansicht nach fehl am Platz. Beim Menschen wirkt sich in den seltenen Fällen einer Vergiftung mit Kupfer diese vornehmlich auf die Leber aus. Neben Stoffwechselerkrankungen können Probleme mit Kupfer bei Säuglingen auftreten, wenn bei der Nahrungszubereitung Kupfergeschirr (»India Childhood Cirrhosis«) oder Wasser aus Hausbrunnen mit niedrigem pH-Wert verwendet wird, das aus Kupferleitungen das Metall anreichert. Ich möchte hier nochmals unterstreichen, dass diese Fälle sehr selten sind und Kupfer für den Menschen normalerweise eben nicht toxisch ist.

Dr. Frank Reichwald, München

Erratum

Korallengärten in kalten Tiefen, Februar 2002

Auf der Seite 62, rechts oben muss es heißen: »Diese Lebensräume fielen selbst in Kaltzeiten nicht trocken, wenn der Meeresspiegel 120 Meter tiefer lag als heute.«

Die Redaktion

Was steuert uns, wenn wir am Steuer sitzen?

Technoskop, Januar 2003

Kein Feedback

Meiner Meinung nach handelt es sich hierbei – aus verhaltenskybernetischer Sicht – um ein typisches Phänomen des fehlenden Feedbacks. Da durch die zunehmende Entwicklung des Fahrkomforts der Fahrer immer weniger sensorische Informationen über die Geschwindigkeit spürt, stellt der Fahrer sein Verhalten auf die (scheinbare) Langsamkeit des Fahrens ein. Die sensorischen Informationen sind beim Fahrer tendenziell in die Weite nach vorne gerichtet, wo Geschwindigkeit weniger wahrgenommen wird.

Durch die fehlenden Druckinformationen (kinästhetischer Sinn) eines Gegenwindes/Fahrtwindes entsteht auch hier die Illusion von Langsamkeit. Die ablesbare Geschwindigkeit auf dem Tacho reduziert sich dann auf eine eher abstrakte Information. Aus diesem Grund kann man auch beobachten, dass Fahrer in offenen Wagen tendenziell langsamer fahren – außer sie suchen den »Sinnesrausch«. Meiner Meinung nach führt kein Weg daran vorbei, will man die Anzahl der Straßentoten und Verletzten wirklich reduzieren, die Geschwindigkeiten der Autos zu drücken.

Axel Enke, Sinzig

Neues Design

Ich wollte Ihnen nur rückmelden, dass mir das neue Layout sehr gut gefällt. Es war richtiggehend ein Weihnachtsgeschenk für mich, das neu designte Heft Ende Dezember zu erhalten. Auch die Klebebindung ist ein großer Gewinn. Vielen Dank für Ihre hervorragende Arbeit.

Bernhard Bergmaier, Linz, Österreich

Das Layout erinnert mich irgendwie an den Focus. Die Gestaltung des Titels hätte nüchterner nicht sein können. Die Kombination von Titel und Schlagwörtern rechts daneben ist unübersichtlich. Die Fonds passen nicht. Der Inhalt ist aber – wie immer – gut.

Oliver Stahlhut, Hannover

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Peiberg, Sigrid Spies
Bildredaktion: Alice Krüßmann, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Natalie Schäfer, Andreas Merkert (stv. Hersteller)
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg, Tel. (06221) 91 26-711, Fax (06221) 91 26-729
Büro Bonn: G. Hartmut Altenmüller, Tel. (02244) 43 03, Fax (02244) 63 83, E-Mail: ghalt@aol.com
Korrespondenten: Dieter Beste, Marion Kälke, Tel. (0211) 908 3357, Fax (0211) 908 33 58, E-Mail: Dieter.Beste@t-online.de
Produktentwicklung: Dr. Carsten Könneker, Tel. (06221) 91 26-770
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. (06221) 91 26-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. (06221) 91 26-741, E-Mail: marketing@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. (06221) 91 26-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Bernhard Epping, Marianne Kolter, Dr. Susanne Lipps, Dr. Frank Scholz, Dr. Michael Springer, Dr. Sebastian Vogel.

Verlag: Spektrum der Wissenschaft, Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, D-69126 Heidelberg, Tel. (06221) 91 26-600, Fax (06221) 91 26-751
Geschäftsleitung: Dean Sanderson, Markus Bossle
Leser- und Bestellservice: Tel. (06221) 91 26-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft, Boschstraße 12, D-69469 Weinheim, Tel. (06201) 60 61 50, Fax (06201) 60 61 94
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Porto-Mehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konten: Deutsche Bank, Weinheim, 58 36 43 202 (BLZ 670 700 10); Postbank Karlsruhe 13 34 72 759 (BLZ 660 100 75)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Sibylle Roth, Tel. (0211) 887-23 79, Fax (0211) 887-23 99; verantwortlich für Anzeigen: Stefan Söht, Postfach 10 26 63, D-40017 Düsseldorf, Tel. (0211) 887-23 86, Fax (0211) 887-28 46
Anzeigenvertretung: Berlin: Dirk Schaeffer, Friedrichstraße 150–152, D-10117 Berlin, Tel. (030) 61 68 61 50, Fax (030) 615 90 05, Telex 114810; Hamburg: Michael Scheible, Burchardstraße 17, D-20095 Hamburg, Tel. (040) 30 18 31 94, Fax (040) 33 90 90; Düsseldorf: Klaus-P. Barth, Werner Beyer, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Postfach 10 26 63, D-40017 Düsseldorf, Tel. (0211) 301 35-20 60, Fax (0211) 133 974; Frankfurt: Anette Kullmann, Annelore Hehemann, Holger Schlitter, Eschersheimer Landstraße 50–54, D-60322 Frankfurt am Main, Tel. (069) 24 24-45 34, Fax (069) 24 24-45 55; Stuttgart: Norbert Niederhof, Königstraße 20, D-70173 Stuttgart, Tel. (07 11) 22 475-40, Fax (07 11) 22 475-49; München: Reinold Kassel, Bernd Swetje, Josephspitalstraße 15, D-80331 München, Tel. (089) 54 59 07-12, Fax (089) 54 59 07-16
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Tel. (02 11) 887-23 87, Fax (02 11) 37 49 55
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 24 vom 01.01.2003.

Gesamtherstellung:
Konradin Druck GmbH, Leinfelden-Echterdingen
© Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, D-69038 Heidelberg.
Kein Teil dieser Zeitschrift darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder in eine von Datenverarbeitungsmaschinen verwendbare Form oder Sprache übertragen oder übersetzt werden. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.
ISSN 0170-2971

Ein Teil unserer Auflage enthält Beilagen von Rothacker, Martinsried; und ABZ Verlag, Zürich. Wir bitten unsere Leser um Beachtung.

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: Rolf Grisebach, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg

ARCHÄOLOGIE

Die Königsgrüfte von Qatna

Bei der letztjährigen Grabungskampagne auf dem westsyrischen Tell Mishrife stießen Tübinger Archäologen unter dem Königspalast auf Grüfte mit wertvollen Schätzen, die neue Einblicke in die Bestattungsriten im alten Syrien erlauben.

Von Christian Dominik Wetzler

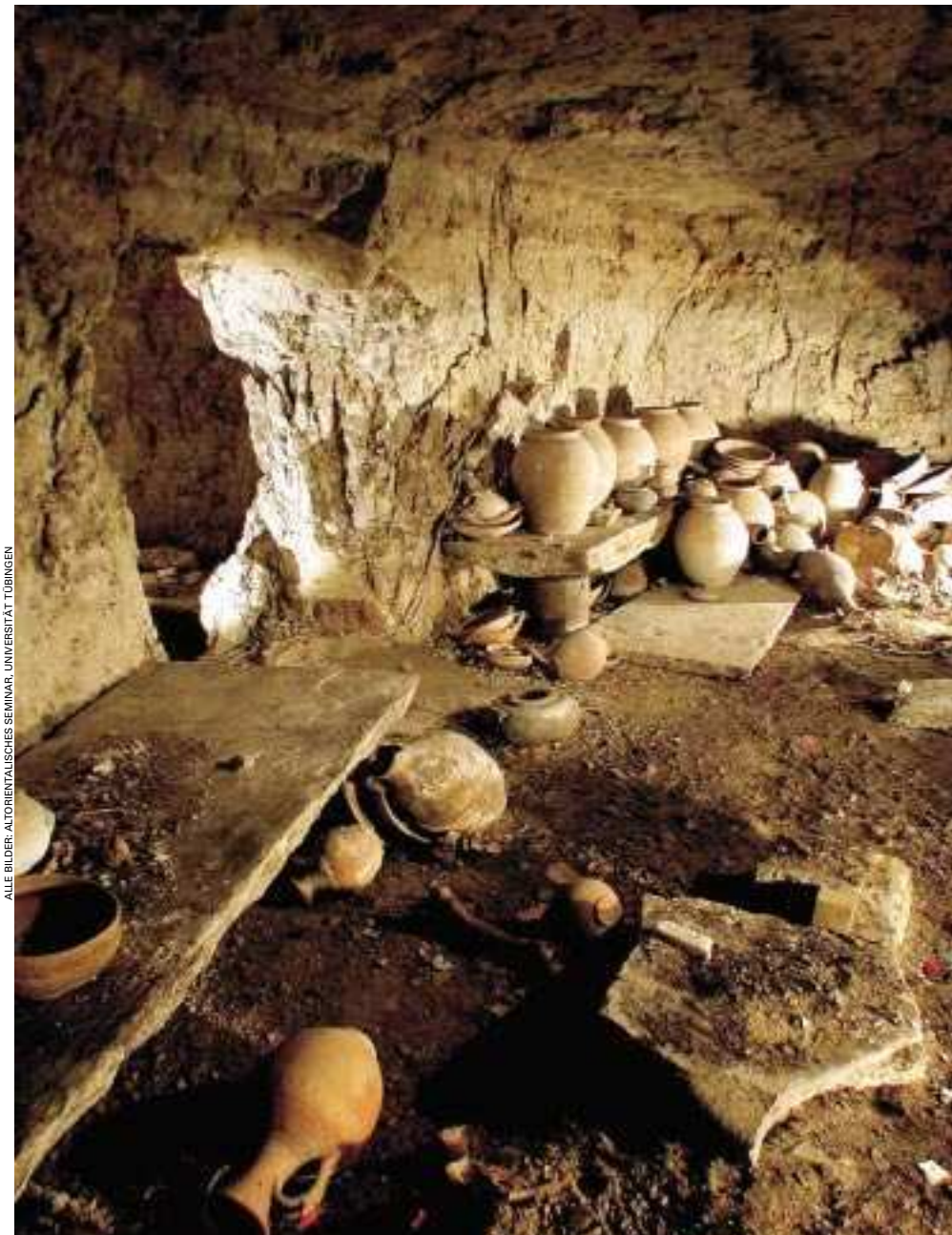
Zweifellos gehört zu großen Entdeckungen auch das sprichwörtliche Quäntchen Glück. Doch Forschungseifer und Beharrlichkeit bereiten den Boden dafür. Das zeigte sich auch bei der jüngsten Entdeckung der Königsgrüfte auf dem westsyrischen Tell Mishrife, unter dem sich die bronzezeitliche Stadt Qatna verbirgt. Deren Ausgrabungsgeschichte begann schon in den 1920er Jahren, als französische Archäologen auf die Überreste eines Königspalastes stießen und ihn freilegten. Doch Wind, Sand und menschliche Bautätigkeit verschütteten die Ruinen wieder, sodass schließlich nicht einmal mehr ihre genaue Lage bekannt war. Auf dem Hügel schoss eine neue Siedlung aus dem Boden.

Erst viele Jahrzehnte später erhielt die Wissenschaft eine zweite Chance. Nachdem die moderne Siedlung abgerissen und wenige Kilometer entfernt wieder errichtet worden war, konnten Archäologen im Herbst 1999 erneut mit der Suche nach Resten der altsyrischen Kultur beginnen. Das internationale Forschungsprojekt – neben Tübinger Archäologen um Peter Pfälzner beteiligten sich auch Kollegen aus Italien und Syrien – hatte die genaue Erkundung und Dokumentation der Stadtanlage von Qatna zum Ziel. Außerdem wollten die Wissenschaftler die Reste des verschütteten Palastes wieder finden und vollständig freilegen.

Im Januar 2000 gab es bereits erste Erfolge zu vermelden: Unter dem Schutt der abgerissenen neuzeitlichen Häuser waren die Archäologen schon nach wenigen Zentimetern auf die Fußböden des bronzezeitlichen Palastes gestoßen, die aus einer bis zu zwanzig Zentimeter dicken Mörtelschicht bestehen. Die Dimensionen dieses Bauwerkes dürften zur Zeit seiner Blüte ihresgleichen gesucht haben: Es umfasste mehr als 18 000 Quadratmeter, war von drei Meter dicken Mauern umgeben und ruhte auf mehr als vier Meter tiefen Fundamenten. Noch heute zählt die Anlage zu den größten Palastruinen Vorderasiens.

Wie sich zeigte, waren die französischen Archäologen Jahrzehnte zuvor nicht allzu gründlich vorgegangen. Das Tübinger Team mit seinem örtlichen Grabungsleiter Mirko Novák entdeckte zahllose Scherben: Überreste von Vorratsgefäßen, die vermutlich gefunden, aber nie dokumentiert und archiviert worden waren. Doch die eigentliche Sensation ereignete sich im Herbst vergangenen Jahres, als die Grabungskampagne kurz vor ihrem planmäßigen Abschluss stand. Da stießen die Forscher in einem Korridor unterhalb des Palastes überraschend auf insgesamt 63 Keilschrifttafeln, die aus der Zeit um 1400 v. Chr. stammen (Bild rechts oben).

Nach Ansicht der Archäologen gehörten sie einst zum königlichen Archiv und gelangten bei der Zerstörung des Palastes in die Kellergewölbe. Ihr Inhalt macht sie für die Wissenschaft besonders wertvoll – zählen sie doch zu den wenigen syrischen Quellen, die Informationen über die poli-



ALLE BILDER: ALTORIENTALISCHES SEMINAR, UNIVERSITÄT TÜBINGEN

In der Hauptkammer der neu entdeckten Königsgruft von Qatna stehen an den Wänden steinerne Bänke, umgeben von zahlreichen Gefäßen aus Keramik und Alabaster.

Diese Tontafeln mit Keilschrifttexten fanden sich auf dem Korridor, der zur Königsgruft führte. Sie gehörten einst zum königlichen Archiv von Qatna und bilden eine wichtige neue Quelle über die Geschichte des Vorderen Orients zu Beginn der späten Bronzezeit.

tische Situation des Vorderen Orients zu Beginn der späten Bronzezeit enthalten. Bisher stützte sich das Wissen über die damalige Geschichte des östlichen Mittelmeerraumes hauptsächlich auf Beschreibungen der Hethiter und Ägypter.

Mit der Entzifferung und Übersetzung der Täfelchen befasst sich Thomas Richter von der Universität Frankfurt. Bisher konnte er gut die Hälfte der Texte entschlüsseln. Es handelt sich sowohl um Urkunden in Form von Berichten, Entscheidungen und Verfügungen als auch um Briefe an die Könige von Qatna. Letztere sind besonders aufschlussreich. So fordert ein hethitischer General die Stadt in einem Schreiben zum Errichten von Befestigungen auf. Das dokumentiert durchaus freundschaftliche Beziehungen zu dem kriegerischen Großreich in Anatolien, mit dem damals intensive Handelskontakte bestanden.

Plötzlicher Untergang

Durch die günstige Lage 200 Kilometer nördlich des heutigen Damaskus konnte sich Qatna vor rund 4000 Jahren zu einem wichtigen ökonomischen und politischen Zentrum entwickeln. Während seiner Blütezeit war es neben dem nordsyrischen Aleppo das reichste und bedeutendste Königtum der Region.

Aber seine Lage wurde ihm auch zum Verhängnis. Selbst vor allem durch Handel zu Wohlstand gelangt, hatte die kleine Königsstadt dem Expansionsstreben der benachbarten Reiche nur wenig militärische Macht entgegenzusetzen. Die Hethiter legten Qatna um 1340 v. Chr. in Schutt und Asche und bereiteten seinem politischen und wirtschaftlichen Einfluss damit ein jähes Ende.

Für die Archäologen war dieser plötzliche Untergang freilich ein Glücksfall. Als der Palast beim Ansturm der Eroberer aus dem Norden den Flammen zum Opfer fiel und weitgehend einstürzte, versperrte der Schutt den Zugang zu den unterirdischen Räumen. Dadurch blieben sie offensichtlich vor der Plünderung verschont.

Der Fund der Keilschrifttafeln war Anlass, die Grabungskampagne zu verlängern. Der Korridor, in dem die Aufzeichnungen entdeckt wurden, führte die Forscher geradewegs zu einem geräumigen Felsschacht: dem Einstieg in eine bis dahin unberührte Gruft. Dort kamen zahlreiche Sarkophage, Knochenreste und Grabbeigaben zum Vorschein; insgesamt 1900 Einzelobjekte waren der Lohn für monatelange Grabungsstrapazen.

An den Felsschacht am Ende des Korridors schließt sich unmittelbar die rechteckige Hauptkammer an. Sie ist fast 35 Quadratmeter groß und mehr als zwei Meter hoch. Drei Nebenkammern ergänzen sie zu einer Art Kleeblatt. Überreste von verschiedenen Skeletten lassen darauf schließen, dass die unterirdische Anlage als dynastische Gruft des Königshauses von Qatna diente. Für diese Hypothese sprechen auch die kostbaren Grabbeigaben: Zwei große Basaltsarkophage enthielten Keramik-, Alabaster-, Silber- und Goldgefäße.

In der Hauptkammer standen Steinbänke zum Abstellen von Kultgegenständen und als Sitzgelegenheit (Bild links unten). Darunter lagen Tierknochen, von den Forschern als Speiseopfer oder Reste von rituellen Mahlzeiten interpretiert. Zwischen teilweise erhaltenen Holzbahren, auf denen ebenfalls Menschen bestattet wurden, fanden sich zahllose Schmuckgegenstände, darunter Hunderte von goldenen Perlen und Plaketten.

Kultische Zeremonien

Von besonderem Interesse für die Wissenschaft ist eine sehr naturalistische, aus Gold geformte menschliche Hand. Dieser so genannte Libationsarm diente nach Angaben der Forscher zur Darreichung von Speise- oder Trankopfern im Verlauf kultischer Zeremonien. Ebenfalls sehr beeindruckt zeigten sich die Archäologen von zwei Statuen, die den Eingang zu der Hauptkammer flankierten. Aus Basalt gemeißelt und rund 85 Zentimeter hoch, stellen sie idealtypische Bildnisse von Königen dar. »Zudem können wir sicher sein, dass die Statuen Gegenstand kultischer Verehrung waren, denn vor ihnen befanden sich Opferschalen«, konstatiert Novák. ▷

Die aus Gold geformte menschliche Hand gehört zu den bedeutendsten Funden in Qatna. Sie diente als so genannter Libationsarm bei kultischen Handlungen zum Darreichen von Speise- und Trankopfern. Wissenschaftler datieren das Objekt auf 1400 v. Chr.

Rechts vor dem Eingang in die Hauptkammer legten die Archäologen eine Statue frei, die sie als idealtypische Darstellung eines Königs deuten.

Als qualitativ hochwertige Erzeugnisse aus der Mitte des zweiten vorchristlichen Jahrtausends eröffnen die Fundstücke einen neuen Blick auf die Kunst Altsyriens. Die Auswertung der Objekte, das Zeichnen, Fotografieren, Rekonstruieren und Archivieren wird nach Ansicht des Grabungsleiters noch Jahre dauern. Neben kunstgeschichtlichen Studien kommen auch moderne naturwissenschaftliche Methoden zum Einsatz, die eine genaue Analyse des Knochenmaterials und der pflanzlichen Funde erlauben. Damit hoffen die Forscher, erstmals die Ausstattung einer altorientalischen Königsgruft präzise und detailliert rekonstruieren zu können.

Das Ausgrabungsteam der Universität Tübingen schaffte es, die Königsgrüfte von Qatna im vergangenen November und Dezember vollständig freizulegen. Die reichhaltige Ausbeute übergab es syrischen Museen zur Aufbewahrung. In diesem Sommer sollen die Arbeiten fortgesetzt werden. »Wahrscheinlich graben wir ab Ende Juli«, prognostiziert Novák, »und hoffentlich können wir dann noch mehr spektakuläre Funde machen.«

Christian Dominik Wetzler ist promovierter Naturwissenschaftler und langjähriger Mitarbeiter bei archäologischen Ausgrabungen. Er lebt als freier Wissenschaftsjournalist in Mainz.

TIEFTEMPERATURPHYSIK

Erstes supraflüssiges Gas erzeugt?

Weiterer Durchbruch in der Quantenphysik: Bei extrem tiefen Temperaturen ließen sich Teilchen dazu bringen, wie eine Supraflüssigkeit reibungsfrei zu fließen, denen dies eigentlich nicht zuzutrauen war.

Von Stefan Maier

In Abwandlung des bekannten Mottos einer Fernsehsendung ist der Preis in der Physik oftmals nicht heiß, sondern kalt. Wie ein Blick auf die Liste der Physiknobelpreise des letzten Jahrhunderts zeigt, wurden viele der begehrten Auszeichnungen für den Nachweis und die Deutung ungewöhnlicher Erscheinungen vergeben, die in Feststoffen, Flüssigkeiten oder Gasen bei extrem tiefen Temperaturen auftreten.

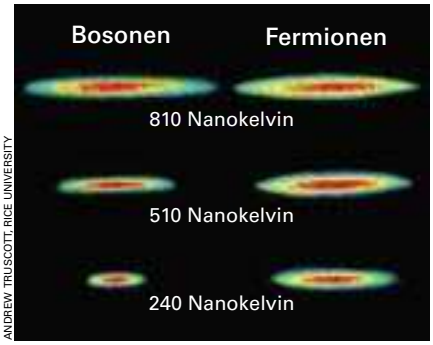
Den Reigen preisgekrönter Arbeiten eröffnete 1911 die überraschende Entdeckung, dass Quecksilber bei nur vier Kelvin – also vier Grad über dem absoluten Nullpunkt von –273,15 Grad Celsius – jeglichen elektrischen Widerstand verliert. Zu dieser Supraleitung gesellte sich 1938 die ebenso frappierende Erscheinung der Suprafluidität: Damals stellte sich heraus, dass Helium-4 unterhalb von zwei Kelvin reibungsfrei fließt. Als Krönung dieser Erfolgsgeschichte konnte 1995 bei Temperaturen im Bereich von einem millionstel Kelvin aus gasförmigen Alkali-Atomen ein so genanntes Bose-Einstein-Kondensat erzeugt werden, in dem die einzelnen Teilchen ihre Individualität aufgeben und sich zu einem einzigen großen Quantenobjekt vereinigen.

All diese merkwürdigen Phänomene beruhen letztlich darauf, dass bei tiefen Temperaturen die klassische Physik ihre Geltung verliert und die Quantenmechanik das Regiment übernimmt. Während sich die Gasatome der Luft zum Beispiel bei Raumtemperatur als kleine, harte Kugeln betrachten lassen, sind sie bei ultrakalten Temperaturen über einen größeren Raumbereich verschmiert. Sie verhalten sich dann wie Wellen, deren Größe mit sinkender Temperatur zunimmt und unterhalb von einem millionstel Kelvin leicht das Zehntausendfache eines üblichen Atomdurchmessers erreicht. Sofern es nur kalt genug ist, können sich die Wellen benachbarter Gasatome daher trotz der geringen Dichte überlappen.

Was in diesem Fall passiert, hängt von der Art der Teilchen ab, genauer gesagt von deren Drehimpuls oder Spin. Die Bausteine eines Atoms – Protonen, Neutronen und Elektronen – haben nämlich alle einen halbzahligen Spin und sind damit so genannte Fermionen. Da der Gesamtspin eines Atoms aus der Summe der Spins seiner Bausteine besteht, ist ein Atom selbst eben-

Gebremstes Schrumpfen

Das unterschiedliche Verhalten von Fermionen und Bosonen zeigt sich deutlich beim Abkühlen einer Gaswolke aus den jeweiligen Teilchen. Bosonen wie Lithium-7 sammeln sich im niedrigsten Energiezustand, in dem sie sich nur noch synchron bewegen. Da sie dadurch immer weniger hin und her schwirren, zieht sich die Gaswolke ziemlich stark zusammen. Fermionen wie Lithium-6 hingegen müssen auch in der größten Kälte fast alle mit höheren Energieniveaus vorlieb nehmen, da die tieferen schon besetzt sind. Der Fermidruck auf Grund der resultierenden »Rangelei« bewirkt, dass die Wolke sehr viel langsamer schrumpft.



ANDREW TRUSCOTT, RICE UNIVERSITY

falls ein Fermion, wenn es eine ungerade Zahl von Komponenten hat; im anderen Fall bezeichnet man es als Boson.

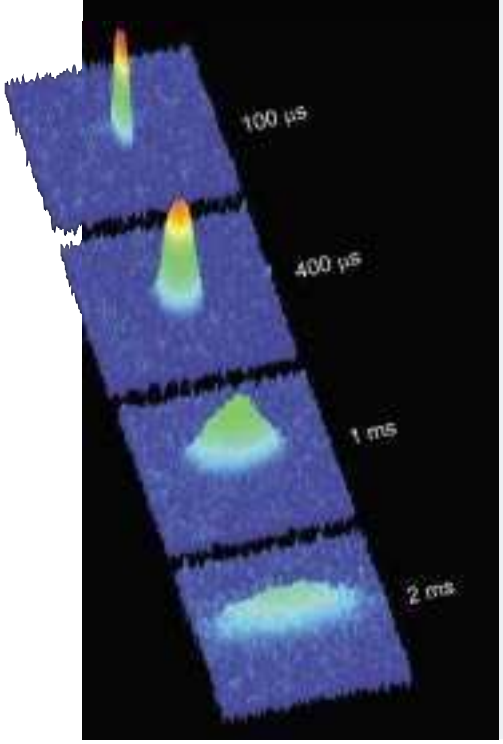
Die beiden Teilchensorten verhalten sich nahe am absoluten Nullpunkt völlig verschieden. Während sich Bosonen unterhalb einer bestimmten Temperatur, die von ihrer Dichte abhängt, alle in demselben Zustand niedrigster Energie anordnen und ein so genanntes Bose-Einstein-Kondensat bilden, stoßen sich Fermionen bei tiefen Temperaturen immer mehr ab. Dieser so genannte Fermidruck ließ sich zwar erst vor vier Jahren in einem durch viele Tricks abgekühlten Fermionengas aus Kalium-40-Atomen direkt nachweisen. Doch schon 1925 erkannte der Schweizer Physiker Wolfgang Pauli (1900–1958) den Grund dafür: Teilchen mit halbzahligem Spin können nie denselben Quantenzustand annehmen (Kasten links unten).

Da Helium-4-Atome aus je zwei Protonen, Neutronen und Elektronen aufgebaut sind, handelt es sich umBosonen. Ihr Übergang in den supraflüssigen Zustand ist daher einfach die Folge einer teilweisen Bose-Einstein-Kondensation. Dass er schon bei zwei Kelvin passiert und nicht erst bei den für Gasen typischen viel tieferen Temperaturen, liegt an der größeren Dichte des flüssigen Heliums. Die Atome sind darin ziemlich eng zusammengedrängt, sodass sich ihre quantenmechanischen Wellen schon früh überlappen.

Verpaarung macht gesellig

Aus demselben Grunde tritt Supraleitung in Festkörpern bereits bei Temperaturen auf, bei denen in Gasen noch keine Quanteneffekte zu beobachten sind. Sie beruht nach gängiger Ansicht darauf, dass sich jeweils zwei Elektronen durch Kopplung mit Gitterschwingungen zu einem Paar zusammenschließen und so ein Boson bilden. Eine solche Paarbildung steckt vermutlich auch hinter der 1972 entdeckten Suprafluidität, die eine Flüssigkeit aus fermionischem Helium-3 unterhalb von etwa drei Millikelvin zeigt.

Theoretisch sollten sich auf die gleiche Weise auch verdünnte Fermionengase in den supraflüssigen Zustand überführen lassen. Deren Atome müssen dazu aber noch viel weiter abgekühlt und die Wechselwirkungen zwischen ihnen künstlich verstärkt werden. Letzteres scheint Forschern um John Thomas an der Duke-Universität in Durham (North Carolina) nun erstmals gelungen zu sein *(Science, Bd. 298, S. 2179)*. ▷



BEIDE BILDER: DUKE UNIVERSITY

Als John Thomas und seine Kollegen an der Duke-Universität in Durham (North Carolina) eine extrem tief gekühlte Gaswolke aus Lithium-6-Atomen sich selbst überließen, verformte diese sich von einer vertikal zu einer horizontal orientierten Zigarre (links) – ein Anzeichen, dass es sich um eine Supraflüssigkeit handeln könnte.

▷ Bei ihrem bahnbrechenden Experiment brachten sie ein Gas aus Lithium-6-Atomen, das in einem wandlosen Behälter aus Magnetfeldern eingeschlossen war, zunächst durch Streuung von Laserstrahlen auf Temperaturen von wenigen tausendstel Kelvin. Zur weiteren Abkühlung diente eine Variante jener Verdampfungskühlung, die auch bei der Herstellung der ersten gasförmigen Bose-Einstein-Kondensate erfolgreich war. Dabei übernimmt ein starker Laserstrahl statt der Magnetfelder die Aufgabe, das Gas festzuhalten. Seine Intensität wird anschließend vorsichtig verringert, sodass die energiereichsten Atome entweichen können. Die übrigen Teilchen haben dann eine geringere mittlere Bewegungsenergie oder Temperatur – sie kühlen nach demselben Prinzip ab wie Kaffee in der Tasse durch das Verdunsten der Oberflächenmoleküle.

Bevor dieser Vorgang wiederholt werden kann, müssen die Atome allerdings wieder ins thermische Gleichgewicht kommen. Das setzt voraus, dass sie trotz des immer stärker werdenden Fermidrucks weiterhin zusammenstoßen. Um dies zu erleichtern, regten die Forscher während der Verdampfungskühlung die Hälfte aller Gasatome mit einem kurzen Radiowellenimpuls in einen anderen Spinzustand an. Dadurch erhöhten sie die Chancen für mögliche Kollisionen ohne Verletzung des Pauli-Prinzips.

Um dem eigentlichen Ziel – der Ausbildung intensiver Wechselwirkungen zwischen den Atomen – näher zu kommen, wendeten Thomas und seine Mitarbeiter einen weiteren Trick an. Da Fermionen wegen ihres halbzahligen Spins grundsätzlich ein magnetisches Moment haben, lässt sich die Intensität ihrer Wechselwirkung mit einem äußeren Magnetfeld steuern. Die Forscher rechneten deshalb aus, wie stark dieses sein muss, damit sich eine Anziehungskraft zwischen den Fermionen entwickelt. Ein solches Feld schalteten sie dann während der Abkühlung ein. Diese ging dadurch sogar einfacher vonstatten, da die Fermionen wegen ihrer Anziehung häufiger zusammenstießen.

Gaswolke bildet Zigarre statt Kugel

Die spannende Frage war nun, ob die Atome wirklich so stark miteinander wechselwirkten, dass sie sich sogar vorübergehend paarten. Um das herauszufinden, entfernten die Wissenschaftler bei einer Temperatur von ungefähr 50 milliardstel Kelvin ihren imaginären Behälter. Wegen der Geometrie der Laserfalle hatte die Gaswolke zu diesem Zeitpunkt die Form einer senkrecht stehenden Zigarre. Ganz sich selbst überlassen, sollte sich diese, falls keine Wechselwirkung zwischen den Atomen bestand, innerhalb einer Millisekunde zu einem kugelförmigen Gebilde ausdehnen – genauso wie ein normales Gas bei Raumtemperatur. Das war jedoch nicht der Fall: Das tief gekühlte Fermigas verwandelte sich vielmehr in eine waagrechte Zigarre.

Diese Formänderung wäre zur Not dadurch erklärbar, dass das Magnetfeld vermehrt Kollisionen zwischen den Atomen auslöste – allerdings nur mit Hängen und Würgen. Und hier wird es interessant. Wenn man nämlich annimmt, dass ein Teil des Fermionengases durch Bildung von Zweierpaaren in einen supraflüssigen Zustand übergegangen ist, lässt sich die bevorzugt horizontale Ausdehnung gemäß einer theoretischen Studie italienischer Wissenschaftler viel besser verstehen. Eine reibungsfrei strömende Supraflüssigkeit sollte sich nämlich in der Richtung, in der sie vorher am meisten eingeengt war, am stärksten ausdehnen.

Noch ist das kein eindeutiger Beweis. Um ihn zu führen, müssten die Forscher als Nächstes versuchen, die Gaswolke in Rotation zu versetzen. Falls es sich wirklich um eine Supraflüssigkeit handelt, würde sie nicht als Ganzes rotieren. Stattdessen entstünden in ihrem Inneren mikroskopisch kleine Wirbel, die sich in einem regelmäßigen Gitter anordnen.

Mit der Möglichkeit, ein supraflüssiges Fermionengas zu erzeugen, dessen interatomare Wechselwirkung künstlich steuerbar ist, ginge ein Traum der Tieftemperaturphysiker in Erfüllung: Sie erhielten ein völlig neues Modellsystem für Vorgänge wie die mysteriöse Hochtemperatursupraleitung in bestimmten Keramiken, bei der ein noch nicht sicher bekannter Mechanismus eine so intensive Interaktion zwischen einzelnen Elektronen bewirkt, dass auch noch bei Temperaturen über hundert Kelvin Supraleitung auftritt. Mit diesem Testsystem ließen sich außerdem Supraflüssigkeiten und vielleicht sogar Neutronensterne, die nur durch den Fermidruck vor dem Kollaps zum Schwarzen Loch bewahrt werden, im Labor genauer ergründen.

Aber auch das bloße Erzeugen eines ultrakalten Gases aus intensiv wechselwirkenden Fermionen stellt bereits einen Durchbruch dar. Eines macht es in jedem Fall deutlich: Die Jagd nach ultrakalten Gasen verspricht auch in diesem Jahrhundert wieder heiße Preise – den ersten gab es schon 2001 für die anfangs erwähnte Herstellung des ersten gasförmigen Bose-Einstein-Kondensats. ◁

Stefan Maier ist promovierter Physiker und arbeitet am California Institute of Technology in Pasadena.

Fliegende Anti-Malaria-Waffen

Erstmals gelang die Konstruktion genmanipulierter Moskitos, die den Erreger der Malaria gar nicht oder nur schlecht übertragen – ein Meilenstein im Kampf gegen die wohl größte Geißel der Menschheit.

Von Stefanie Reinberger

Malaria scheint uns Mitteleuropäer nichts anzugehen. Es ist eine Tropenkrankheit, und die *Anopheles*-Mücke, die den parasitären Erreger überträgt, kommt in unseren Breiten nicht vor. Und doch: Im Zeitalter der Fernreisen wirft so manche Urlaubsplanung die Frage nach sinnvoller Malaria-Prophylaxe auf. Plötzlich rückt die Tatsache ins Bewusstsein, dass 40 Prozent der Weltbevölkerung in Malaria-Gebieten leben. Nach Schätzungen der Weltgesundheitsorganisation (WHO) erkranken jedes Jahr etwa 100 bis 200 Millionen Menschen an der Seuche, und zwei bis drei Millionen sterben daran. Selbst in Europa gibt es jährlich etwa 12 000 Malaria-Fälle – darunter auch solche, bei denen sich Menschen durch den Stich einer eingeflogenen *Anopheles*-Mücke infizieren, ohne je in einem tropischen Land gewesen zu sein.

Weltweit ist die Seuche derzeit auf dem Vormarsch; denn immer mehr Plasmodien, wie die einzelligen Erreger heißen, entwickeln Resistenzen gegen die vorhandenen Medikamente. Die Suche nach Möglichkeiten, die Krankheit zu behandeln und ihre weitere Ausbreitung zu verhindern, wird also immer dringender.

Eine Forschungsgruppe an der Case Western Reserve University in Cleveland (Ohio) hat unlängst einen völlig neuen Weg zu ihrer Bekämpfung beschritten. Statt die Plasmodien wie bisher mit Medikamenten im menschlichen Körper abzutöten, unterbrechen Marcelo Jacobs-Lorena und seine Mitarbeiter den Infektionszyklus in der *Anopheles*-Mücke. Dazu haben sie einzelne Moskitos genetisch so verändert, dass sie die Parasiten nicht mehr auf den Menschen übertragen können.

Die Hauptrolle spielt dabei ein kleines Peptid (eine kurze Aminosäurekette) mit dem Namen SM1, das von den genmanipulierten Mücken gebildet wird. Es verhindert, dass reifende Plasmodien vom Darm in die Speicheldrüse der Insekten wandern. Damit bleiben sie in den Eingeweiden gefangen und können nicht mehr mit ▷

Mücken der Gattung *Anopheles* übertragen die Malaria beim Blutsaugen. Sie sind damit ein ideales Ziel zur Unterbrechung des Infektionszyklus.

ROGER ERITJA

dem Speichel, den die Moskitos beim Biss absondern, auf den Menschen übertragen werden.

Dieser Erfolg ist das Ergebnis langer, systematischer Forschungsarbeiten. Den Anfang machte die eingehende Untersuchung des Infektionszyklus von Plasmodien. Dabei gelangten die Wissenschaftler zu der Überzeugung, dass es in den *Anopheles*-Mücken einen Rezeptor geben muss, der den Parasiten als eine Art Taxi dient, das sie vom Darm in die Speicheldrüse befördert. Doch sie hatten keine Ahnung, wie er aussieht. In dieser Situation versuchten sie es mit der Schrotschuss-Methode: Sie stellten aufs Geratewohl eine Vielzahl künstlicher Peptide her und hofften, dass vielleicht eines darunter ist, das sich zufällig an den Rezeptor bindet und ihn dadurch dingfest macht. Und sie hatten Glück. Tatsächlich blieb eines der Konstrukte, eben das mit der Bezeichnung SM1, spezifisch im Mitteldarm und in der Speicheldrüse der Moskitos hängen – also dort, wo sich auch der gesuchte Rezeptor befinden sollte.

Von Anfang an hatte Jacobs-Lorena darauf spekuliert, dass ein möglicher Köder den Rezeptor nicht nur angelt, sondern auch blockiert. Als Test verfütterten sie daher SM1 an *Anopheles*-Mücken. Begeistert stellten sie fest, dass die Insekten daraufhin die Fähigkeit verloren, Plasmodien zu übertragen. Das brachte die Forschergruppe zur festen Überzeugung, mit dem SM1-Peptid den Schlüssel zu einer neuen Waffe gegen Malaria in der Hand zu halten.

Blockade im Darm

Allerdings ist es in freier Wildbahn nicht möglich, Moskitos mit Peptiden zu füttern. Im nächsten Schritt musste es also darum gehen, genetisch veränderte *Anopheles*-Mücken zu züchten, die das Peptid selbst bilden. Dies sollte möglichst nur im Darm der Insekten geschehen – und nur dann, wenn es für die Malariaabwehr notwendig ist: nach einer Mahlzeit mit potenziell plasmodienverseuchtem Blut.

Deshalb konstruierten die Wissenschaftler ein künstliches Gen, das außer der Erbinformation für das SM1-Peptid auch einen regulatorischen Abschnitt trug, der seine Produktion steuert. Diesen Abschnitt besorgten sie sich von dem Gen für das Verdauungsenzym Carboxypeptidase, von dem sie zuvor schon nachgewiesen hatten, dass es nur im Mitteldarm nach einer Blutmahlzeit angeschaltet wird. Per Mikroinjektion – einer Methode, mit der sich Erbsubstanz direkt in das vorgesehene Gewebe spritzen lässt – brachten sie das Konstrukt aus vier SM1-Abschnitten plus Steuereinheit und Fluoreszenzmarker in *Anopheles*-Embryonen ein. Zwar reiften nur wenige dieser Embryonen zu genetisch veränderten erwachsenen Moskitos heran. Doch diese wenigen Exemplare genügten zur Erfolgskontrolle.

M. JACOBS-LORENA ET AL., NATURE, BD. 417, S. 453

Die genmanipulierten *Anopheles*-Mücken bilden in ihrem Mitteldarm ein Peptid, das den Transport des Malaria-Erregers in die Speicheldrüsen unterbindet: Es entert das »molekulare Taxi«, das für diesen Transport sorgt. Das Foto zeigt eine normale Mückenlarve (Mitte) und zwei transgene Exemplare in Rücken- (links) und Bauchlage (rechts). Das fragliche Peptid ist mit einem grünen Fluoreszenzfarbstoff markiert und findet sich im Mitteldarm sowie im Kopfbereich.

Wenn die Wissenschaftler die genmanipulierten Mücken mit Blut fütterten, fanden sich nach sechs Stunden im Darm große Mengen an SM1-Peptid, das erst nach 36 Stunden langsam wieder abgebaut wurde. Ein solcher Konzentrationsverlauf ist ideal, denn genau in diesem Zeitrahmen entwickelt sich die neue Generation von Plasmodien so weit, dass sie bereit für den Marsch in die Speicheldrüse ist.

Die Voraussetzungen für die Blockade stimmten also. Aber würde das künstliche Gen bei einer echten Infektion mit Plasmodien auch wunschgemäß in Aktion treten? Gespannt machten die Forscher die Nagelprobe und ließen die genetisch veränderten Mücken ihren Blutdurst nunmehr an malariainfizierten Mäusen stillen.

Sie wurden nicht enttäuscht: Die Anzahl der Oozysten – der Entwicklungsstufe, die vom Darm in die Speicheldrüse wandert – lag bei den Versuchstieren um 68,7 bis 94,9 Prozent niedriger als in einer Kontrollgruppe. Entsprechend gering war die Infektiosität. In drei Experimenten saugte jeweils eine andere infizierte genmanipulierte Mücke an acht, 13 bzw. zehn gesunden Mäusen. Lediglich im letzten Versuch fand eine Übertragung von Plasmodien statt – allerdings nur bei drei Tieren (dreißig Prozent) gegenüber sieben Tieren (siebzig Prozent) im Kontrollexperiment.

Damit war es der Forschergruppe gelungen, die ersten genetisch veränderten Anopheles-Mücken zu züchten, die selbst einen Anti-Malaria-Stoff bilden und damit den Infektionszyklus unterbrechen oder zumindest behindern. In freier Natur enthalten die Tiere viel weniger Parasiten als im Labor, sodass die Übertragungsrate noch geringer sein müsste als im Experiment.

Schonende Seuchenbekämpfung

Allerdings weckt eine brandneue Untersuchung Zweifel, ob sich die genmanipulierten Mücken auch in der Freiheit behaupten *(Science, Bd. 299, S. 1225)*. Zwar zeigen sie sich im Labor genauso vital wie ihre unveränderten Artgenossen, leben also etwa gleich lange und legen genauso viele Eier. Wurden sie aber mit normalen Mücken zusammen im Käfig gezüchtet, ging ihr Anteil an der Population stetig zurück; nach 16 Generationen waren sie ausgestorben. Noch ist unklar, ob die genetische Veränderung selbst oder Begleitumstände der Genmanipulation wie die Einführung des Fluoreszenzmarkers oder Inzucht-Probleme den Fitness-Nachteil verursachen.

Trotz dieser Vorbehalte bildet die Herstellung der genmanipulierten *Anopheles*-Mücken nach Einschätzung der Entwicklungsbiologen Gareth Lycett und Fotis Kafatos vom Europäischen Laboratorium für Molekularbiologie in Heidelberg einen Meilenstein in der Malaria-Forschung. Die Waffe von Jacobs-Lorena und seinen Mitstreitern hat nicht nur ein einmaliges Wirkungsprinzip, sondern weist auch den Weg zu einer schonenden biologischen Malaria-Bekämpfung ohne Nebenwirkungen für den Menschen oder Schädigung der Umwelt – wie bei früheren Versuchen, die *Anopheles*-Mücke mit DDT auszurotten.

Stefanie Reinberger ist promovierte Biologin mit Schwerpunkt Virologie und arbeitet als freie Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.

Brodelnder Gaskessel

Wie ein kochender Lavasee, aus dem glühende Magmafetzen emporgeschleudert werden, erscheint hier das Zentrum (oben) der 50 Millionen Lichtjahre entfernten Galaxie NGC 3079 (rechts). Allerdings bestehen die Fontänen, die 2000 Lichtjahre hoch aus der galaktischen Scheibe hervorschießen, nicht aus geschmolzenem Gestein, sondern aus extrem heißem Gas – mit Temperaturen zwischen einigen zehntausend (rot) und mehreren zehn Millionen Grad Celsius (blau). Und sie bewegen sich mit Geschwindigkeiten von mehr als zwei Millionen Kilometer pro Stunde. Ursache ist ein Superwind, der vom Galaxienkern ausgeht. Er hat das relativ kühle Gas dort weggefegt, zu länglichen Fetzen oder Fäden auseinander gerissen und aufgeheizt. Dieser Wind entstammt einer Häufung von Supernova-Ausbrüchen oder einer heftigen Aktivitätsphase eines riesigen Schwarzen Lochs im Zentrum der Galaxie. Er befördert schwere Elemente in die Randbezirke des Milchstraßensystems, wo sie neue Sterne entstehen lassen. Seine überraschende Heftigkeit legt nahe, dass das Phänomen bisher unterschätzt wurde. Das Bild ist eine Kombination aus einer aktuellen Aufnahme des Röntgensatelliten Chandra und einem älteren Foto des Weltraum-Observatoriums Hubble.

NASA / CXC / UNIVERSITÄT VON NORTH CAROLINA / G. CECIL

Klarheit über das Klima

Vor 25 Jahren bestätigte sich die Vermutung, dass die großen Vereisungen der Erdgeschichte astronomische Ursachen haben. Doch auch die Ozeane können, wie sich seither zeigte, das Klima kippen lassen.

Von Jean-Claude Duplessy

Um die Mitte des 20. Jahrhunderts steckte die Erforschung der irdischen Klimageschichte in einer Sackgasse. Geologischen Befunden zufolge hatte es in der letzten Jahrmillion vier große Vereisungen in Europa und Nordamerika gegeben. Sie ließen sich durch die Kartierung von Moränen nachweisen – Halden aus Gesteinsschutt, den Gletscher transportiert und an ihren Rändern abgeladen haben. Doch die Ursache dieser gewaltigen Kälteeinbrüche war ein Rätsel. Zur Erklärung postulierten manche Geologen Phasen eines intensiven Vulkanismus, dessen Auswurfmaterial die Sonne verdunkelt und eine Abkühlung des Planeten verursacht habe. Andere Forscher vermuteten einen periodischen Rückgang der Sonnenaktivität. Nur wenige glaubten an die astronomische Klimatheorie, die der serbische Geophysiker Milutin Milankovic 1941 entwickelt hatte.

Nach dieser Theorie beruhen Klimaänderungen auf periodischen Variationen der Erdumlaufbahn um die Sonne. Beispielsweise zieht sich diese Bahn unter dem Einfluss des Mondes und der anderen Planeten im Laufe der Zeit leicht in die Länge und wird dann wieder beinahe kreisförmig – ein Vorgang, der sich etwa alle 100 000 Jahre wiederholt. Weil die Erde wie ein gekippter Kreisel taumelt (präzediert), ändert sich außerdem die Neigung ihrer Rotationsachse gegenüber der Umlaufebene mit einer Periode von 41 000 Jahren; sie schwankt dabei um etwa 1,5 Grad um den aktuellen Wert. Schließlich variiert der Abstand zwischen Erde und Sonne zum Zeitpunkt der Sommer-Sonnenwende über einen Zeitraum von ungefähr 21 000 Jahren.

Durch diese periodischen Schwankungen der Bahnparameter ändert sich der Einfallswinkel der Sonnenstrahlen an der Erdoberfläche. Damit variiert – auch bei gleich bleibender Aktivität der Sonne – die pro Flächeneinheit aufgefangene Energiemenge auf der Nordhalbkugel im Sommer. Milankovic berechnete diese Variationen und erklärte sie zur Ursache von Klimaschwankungen. Allerdings hätten sich nach seiner Hypothese im Verlauf der letzten Jahrmillion zahlreiche Gletschervorstöße ereignen müssen. Für die Geologen existierten jedoch nur jene vier Vereisungen, die sie anhand der Moränen ermittelt hatten – ein gewichtiges Argument gegen die astronomische Theorie.

Der Kalte Krieg mochte politisch ein dunkles Kapitel gewesen sein, aber der Paläontologie brachte er einen unverhofften Aufschwung:

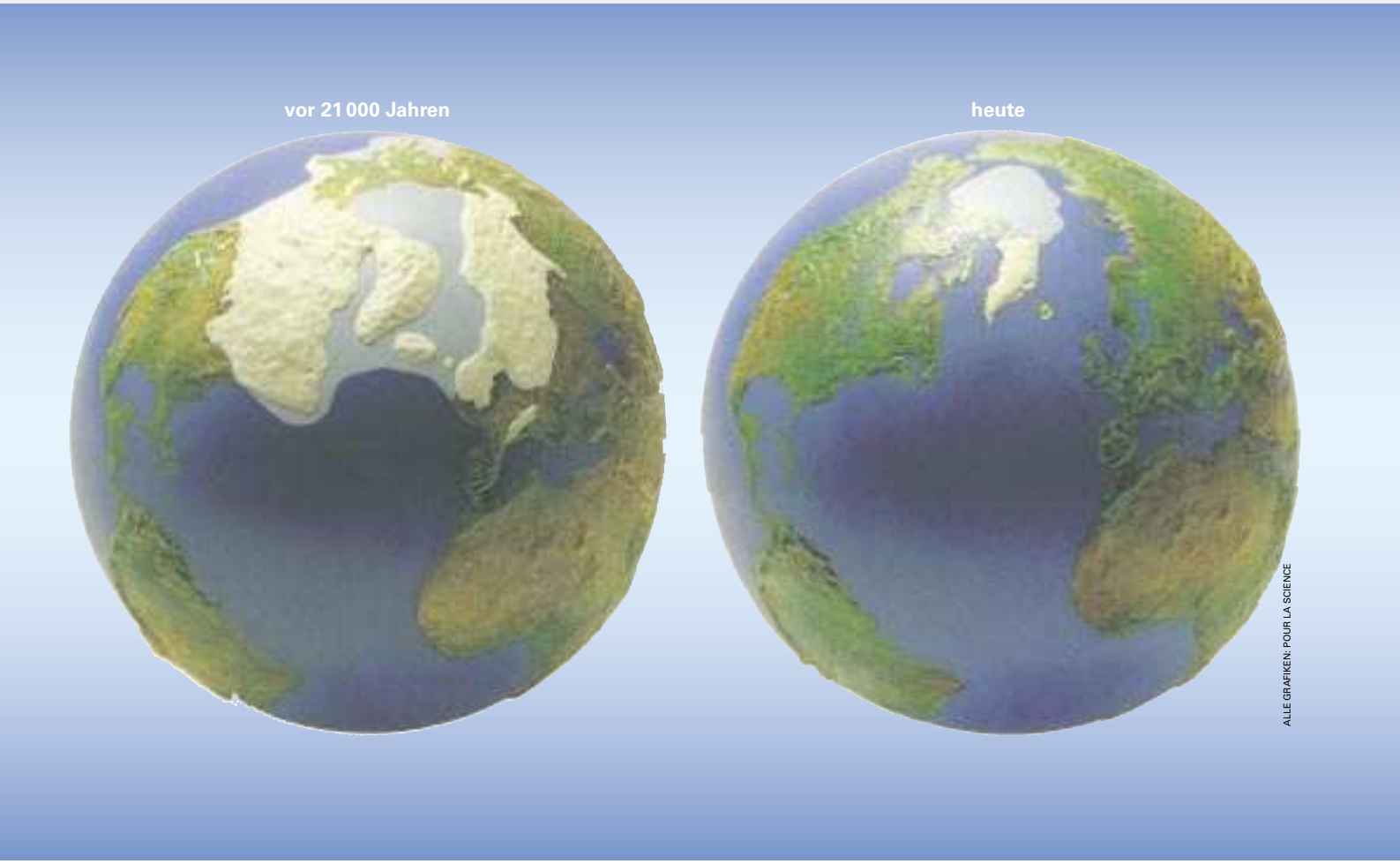
SERIE

25 Jahre Spektrum DER WISSENSCHAFT

In dieser 12-teiligen Serie berichten prominente Forscher aus ihrem Fachgebiet über wissenschaftliche Highlights der letzten 25 Jahre, die aktuelle Situation und künftige Perspektiven.

Teil I: Paläoanthropologie
Teil II: String-Physik
Teil III: Gehirnforschung
Teil IV: Klimaforschung

Im nächsten Heft
Teil V: Mathematisches Denken



ALLE GRAFIKEN: POUR LA SCIENCE

Die Großmächte suchten in allen Weltmeeren Präsenz zu zeigen und bedienten sich dazu auch ozeanografischer Forschungsschiffe. Diese gewannen bei Bohrungen in den Meeresgrund mehrere Meter lange Sedimentkerne, in denen das Alter des Gesteins mit der Tiefe zunahm. Die Kerne enthielten zahlreiche mikroskopisch kleine Gehäuse von Algen oder fossilen Tieren, die Zeugnis von den einstigen Umweltbedingungen ablegten. So ließ sich die jeweilige lokale Geschichte des Ozeans über einige zehn- bis hunderttausend Jahre zurückverfolgen.

Die astronomische Theorie triumphiert

Das Jahrzehnt zwischen 1970 und 1980 brachte wichtige Neuerungen. John Imbrie und Nilva Kipp, Paläontologen an der Brown-Universität in Providence (Rhode Island), entwickelten eine Methode zur statistischen Analyse der fossilen Fauna in den Bohrkernen. Schicht für Schicht registrierten sie die Häufigkeit von Arten, von denen man weiß, ob sie es lieber warm oder kalt haben. Auf diese Weise konnten sie die Oberflächentemperatur des Meeres, in dem die Tiere einst gelebt hatten, bis auf rund ein Grad genau bestimmen.

Parallel dazu zeigte Nicholas Shackleton von der Universität Cambridge, dass das Mengenverhältnis zwischen den Sauerstoffisotopen der Masse 18 und 16 ($^{18}O/^{16}O$) in Foraminiferen (einer Gruppe mariner Einzeller) vor allem davon abhängt, wie viel Wasser in Form von Eiskappen auf den Kontinenten gebunden ist (Kasten auf Seite 24). Die Isotopenanalyse der Bohrkerne gab damit Aufschluss über Zeitpunkt und Dauer von Vereisungsperioden (Kasten auf Seite 22). Auf diese Weise ließen sich vor genau 25 Jahren etwa zehn große Vereisungen und noch mehr Gletschervorstöße geringeren Ausmaßes innerhalb der letzten Jahrmillion nachweisen. Ihre Chronologie stimmte hervorragend mit den Berechnungen von Milankovic überein: Die astronomische Theorie triumphierte!

Die Schwankungen des $^{18}O/^{16}O$-Verhältnisses zeichnen einen globalen Klimaparameter nach: das Eisvolumen auf den Kontinenten. Mit ihrer Hilfe lassen sich in Bohrkernen aus verschiedenen Ozeanen diejenigen Schichten auffinden, die den Höhepunkten einer Vereisung oder einer Warmzeit entsprechen. So kam die Idee auf, im Rahmen eines internationalen Programms, das den Namen Climap erhielt, den Zustand der Erde im Maximum der letzten Vereisung zu rekonstruieren, das etwa 21 000 Jahre zurückliegt. Das überraschende Ergebnis: Zu jener Zeit erhoben sich über Kanada und ▷

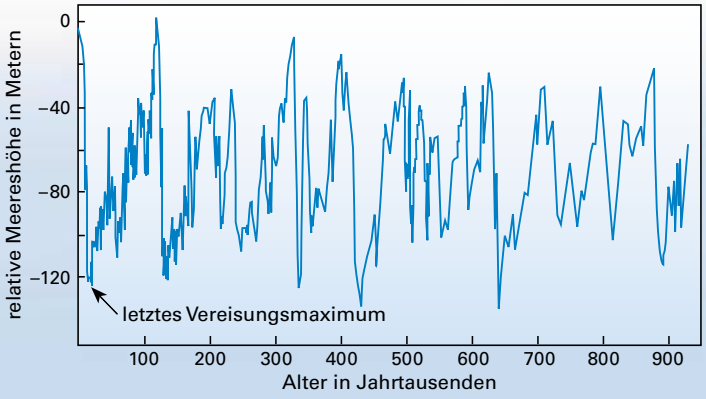
Auf dem Höhepunkt der letzten Kaltzeit vor 21 000 Jahren bedeckten Eiskappen Kanada und Nordeuropa. Sie überspannten auch die Nordmeere einschließlich der Inseln Grönland und Island. Der Ärmelkanal und der Festlandsockel vor der Bretagne lagen trocken. Im Durchschnitt war es auf der Erde sechs Grad kälter als heute. Doch nicht überall sanken die Temperaturen gleich stark: Die Abkühlung erfasste vor allem den Nordatlantik-Raum und Japan; in den Tropen war sie geringer.

▷ Nordeuropa regelrechte Gebirge aus Eis von drei bis vier Kilometern Höhe (Bild auf Seite 21). Die Atmosphäre war so trocken, dass es kaum regnete; deshalb hatten sich überall auf den Kontinenten Wüsten ausgebreitet. Allerdings lag die mittlere Lufttemperatur nur etwa sechs Grad Celsius unter dem heutigen Wert. Demnach hat eine Abkühlung des Planeten von wenigen Grad bereits dramatische Folgen, die von Region zu Region stark variieren.

Weitere Erkenntnisse ergab die Auswertung von Eisbohrkernen. Auf Initiative von Willi Dansgaard in Kopenhagen, Claude Lorius in Grenoble und Hans Oeschger in Bern brachten französische, dänische, schweizerische, amerikanische und russische Polarexpeditionen Bohrungen in die Eisdecken Grönlands und der Antarktis nieder. Anhand des $^{18}O/^{16}O$-Verhältnisses im Eis ließen sich die Schwankungen der Lufttemperatur in den Polargebieten während der vergangenen 400 000 Jahre bestimmen: Sie bestätigten die Ergebnisse der früheren Untersuchungen an marinen Sedimentbohrkernen bis ins Detail.

Doch das war noch nicht alles. Die Bohrkerne aus den polaren Eiskappen enthielten auch, eingeschlossen in mikroskopisch kleinen Bläschen, Proben der einstigen Luft. Deren Analyse sorgte für eine weitere große Überraschung. Bis dahin hatte man den Kohlenstoffkreislauf der Erde für praktisch unveränderlich gehalten. Nun aber zeigte sich, dass die Atmosphäre in den Vereisungsperioden die Treibhausgase Kohlendioxid und Methan in viel geringerer Konzentration enthielt als während der Warmzeiten. Das verminderte den natürlichen Treibhauseffekt unseres Planeten und trug so zur Abkühlung bei. Die Gründe dafür sind noch weitgehend unklar. Doch macht das Phänomen deutlich, wie anfällig die biogeochemi-

Wechselspiel zwischen Meeresspiegel und Eiskappen



Wenn die Gletscher auf den Kontinenten wachsen, sinkt der Meeresspiegel. So lag er auf dem Höhepunkt der letzten Kaltzeit vor 21 000 Jahren 120 Meter tiefer als heute. Demnach waren damals zusätzliche 50 Millionen Kubikkilometer Wasser als Inlandeis auf den Kontinenten gebunden. Wie die Rekonstruktion der Meeresspiegelschwankungen während der letzten Jahrmillion zeigt, folgten die Vereisungsmaxima im Abstand von etwa 100 000 Jahren aufeinander. Dieses Intervall entspricht der Periode, mit der die Erdbahn sich abflacht und wieder rundet (ihre Exzentrizität ändert) – in Einklang mit der astronomischen Klimatheorie des serbischen Geophysikers Milutin Milankovic, die sich vor 25 Jahren durchgesetzt hat.

schen Kreisläufe sind und wie empfindlich sie auf Klimaschwankungen reagieren.

Anfang der 1980er Jahre war dann die Klimageschichte der Erde während der letzten Jahrmillion in groben Zügen rekonstruiert. Im Großen und Ganzen stimmte sie mit den Vorhersagen der Milankovic-Theorie überein. Beim genauen Hinsehen jedoch zeigten sich kleine Abweichungen. Was war der Grund dafür?

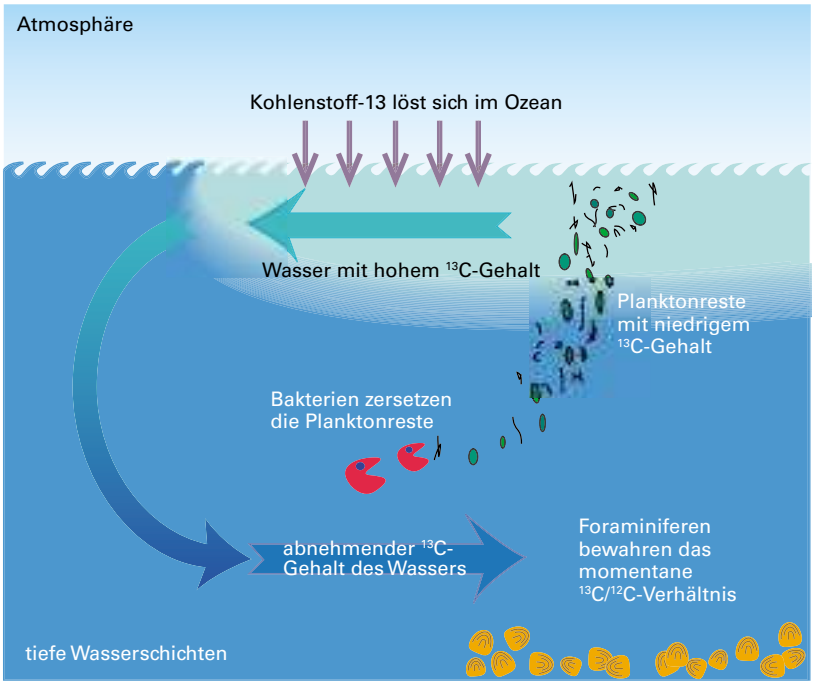
Förderband im Meer

Schon 1979 wies Henry Stommel an der Woods Hole Oceanographic Institution darauf hin, dass die Ozeane genauso viel Wärme transportieren wie die Atmosphäre. Die Vermutung lag daher nahe, dass großräumige Meeresströmungen das Klima beeinflussen könnten.

Diese Strömungen waren in den 1970er Jahren kartiert worden. Demnach existiert heute ein weltumspannendes ozeanisches Zirkulationsmuster. Kaltes Oberflächenwasser sinkt im Nordatlantik ab, strömt in großer Tiefe nach Süden und gelangt an Südafrika vorbei in den Indischen und Pazifischen Ozean (Bild auf Seite 24). Dort steigt es langsam wieder auf, erwärmt sich und fließt an der Oberfläche, gleichfalls rund um Afrika, in den Süd- und schließlich den Nordatlantik zurück, wo es sich abkühlt und erneut absinkt. In den Weltmeeren existiert also ein gigantisches Förderband. Es verfrachtet letztlich das gesamte warme Wasser in den Nordatlantik, wo es den angrenzenden Ländern als künstliche Heizung dient. Der schon länger bekannte Golfstrom ist ein Teil davon.

War dieses Förderband auch während der Vereisungsperioden aktiv? Um das festzustellen, mussten Paläoklimatologen eine Möglichkeit finden, die einstigen Meeresströmungen zu rekonstruieren. Tatsächlich konnten meine Mitarbeiter und ich am Laboratorium für Klima- und Umweltwissenschaften (LSCE) in Gif-sur-Yvette zeigen, dass die Zirkulation des Tiefenwassers mit Schwankungen im $^{13}C/^{12}C$-Verhältnis des darin gelösten Kohlendioxids einhergeht.

An der Oberfläche stellt sich das Mengenverhältnis zwischen den beiden Kohlenstoff-Isotopen durch Gasaustausch mit der Atmosphäre auf einen bestimmten Wert ein. Während das Wasser dann nach dem Absinken im Nordatlantik in der Tiefe durch sämtliche Weltmeere zirkuliert, nimmt es organische Überreste aus abgestorbenem Plankton auf, die von oben herabrieseln (Bild rechts oben). Deren Kohlenstoff ist wie bei allen Lebewesen an ^{13}C verarmt. Bakterien verwandeln diesen Detritus in Kohlendioxid, das folglich ebenfalls relativ wenig von dem schweren Isotop enthält. Je weiter sich das Tiefenwasser von seinem Ursprungsort entfernt, desto mehr abgestorbene organische Materie nimmt es auf und desto tiefer sinkt der ^{13}C-Gehalt des gelösten Kohlendioxids. Benthische Foraminiferen, die teils in einer Wassertiefe von einigen Kilometern auf dem Sediment am Meeresgrund leben, bauen aus diesem Gas ihre Kalkschalen auf und konservieren so dessen momentanes $^{13}C/^{12}C$-Verhältnis.



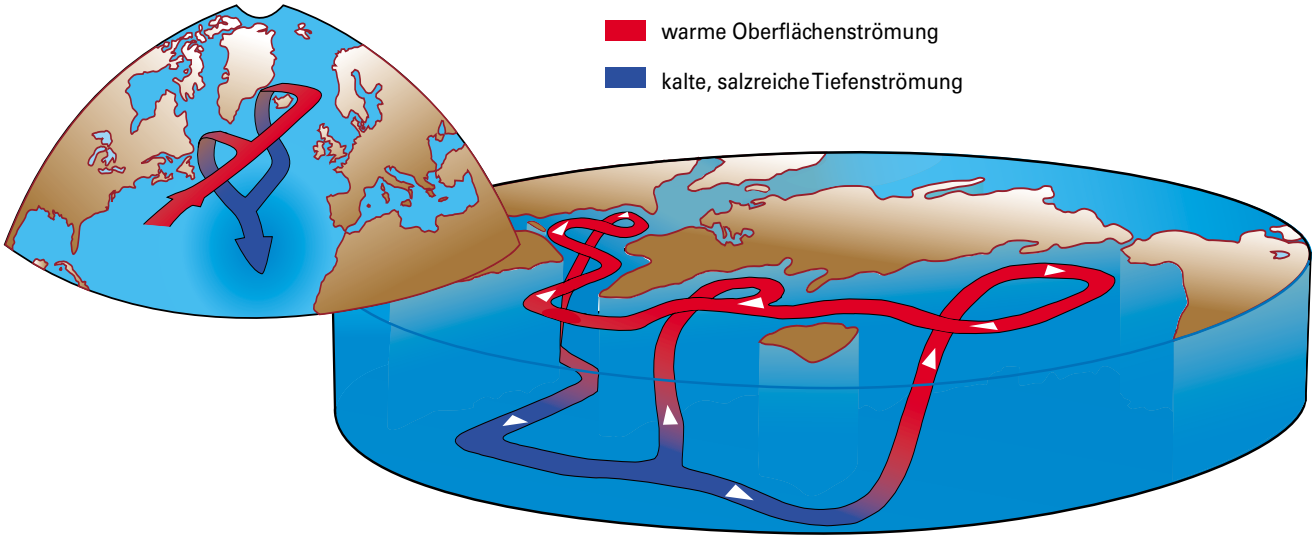
Anhand des Kohlenstoff-Isotops der Masse 13 lässt sich die Zirkulation des Meerwassers verfolgen. Kohlendioxid aus der Luft löst sich im oberflächennahen Wasser, das so mit dem charakteristischen $^{13}C/^{12}C$-Verhältnis der Atmosphäre absinkt. Je weiter es in der Tiefe strömt, desto mehr bakteriell zersetzte Überreste von Plankton, die wenig ^{13}C enthalten, nimmt es auf. Dadurch sinkt sein ^{13}C-Gehalt. Foraminiferen am Boden bauen aus dem Kohlendioxid mit dem erniedrigten $^{13}C/^{12}C$-Verhältnis ihre Kalkschalen auf.

Mit ihrer Hilfe erstellten Shackleton und ich ab 1984 die ersten Rekonstruktionen der früheren weltweiten Meerwasserzirkulation. Dabei stützten wir uns auf benthische Foraminiferen aus Bohrkernen, die auf verschiedenen Breitengraden und in unterschiedlichen Wassertiefen gewonnen worden waren. Unsere Rekonstruktionen zeigten, dass in Kaltzeiten das Förderband erlahmte (Bild auf Seite 25). Obwohl weiterhin im Nordatlantik Wasser absank, nahm seine Menge während der letzten Vereisungsperiode um etwa die Hälfte ab.

Dieser Rückgang lag an der geringeren Dichte des Oberflächenwassers, das wegen der tieferen Temperaturen weniger verdunstete, sodass der Salzgehalt relativ niedrig blieb. Bei nachlassendem Förderband versiegte auch der Wärmestrom Richtung Nordatlantik, was zu den niedrigen Temperaturen auf den Kontinenten der Nordhalbkugel beitrug. Insgesamt bestätigten unsere Befunde, dass das Klima nicht nur vom Einfallswinkel der Sonnenstrahlung abhängt, sondern auch von Meeresströmungen beeinflusst wird.

Armadas von Eisbergen

Eine vor zehn Jahren gemachte Entdeckung sollte dies eindrucksvoll demonstrieren. Lange glaubte man, die Klimaschaukel bewege sich gemächlich im Rhythmus der langsam variierenden astronomischen Parameter. Doch dann zeigte eine 1993 ▷



▷ durchgeführte Bohrung in Grönland, dass sich die über das Jahr gemittelte Lufttemperatur an einem Ort manchmal in weniger als einem Jahrhundert um zehn bis zwanzig Grad Celsius ändern kann. Diese Sprünge erfolgen in Zyklen: Auf eine schnelle, progressive Abkühlung folgt eine Phase extremer Kälte und nach höchstens einigen Jahrtausenden eine ebenso rasche Erwärmung. Mehr als ein Dutzend solcher großen Oszillationen, die nach ihren Entdeckern Dansgaard-Oeschger-Zyklen genannt wurden, traten während der letzten Vereisung auf.

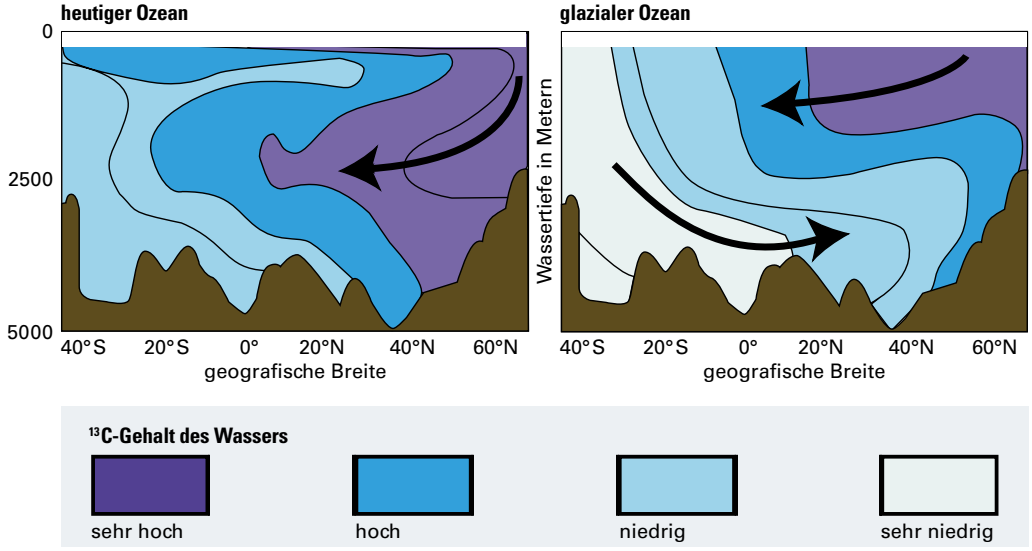
Ihre Ursache war zunächst ein Rätsel. Doch 1998 fanden Gerard Bond und seine Mitarbeiter am Lamont-Doherty-Observatorium der Columbia-Universität in New York und Laurent Labeyrie vom LSCE die Lösung – und zwar im Ozean. Sie stellten fest, dass die großen Gletscher, die Europa und Nordamerika bedeckten, in gewissen Zeitabständen Armadas von Eisbergen freisetzten. Diese schmolzen und ließen auf ihrer Zugbahn den mitgeführten Gesteinsschutt zurück. Er bildet heute durchgängige Schichten in den Sedimenten des Nordatlantiks, so zahlreich waren die Eisberge. Der deutsche Geologe Hartmut Heinrich beschrieb die Schichten als Erster. Deshalb bezeichnet man die Invasionen der Eisberg-Geschwader als Heinrich-Ereignisse.

Die schmelzenden Eismassen hinterließen eine salzarme Wasserschicht, die im Nordatlantik, wo das Oberflächenwasser gewöhnlich absinkt, das salzigere und damit dichtere Meerwasser überdeckte und dessen Absinken behinderte. Dadurch verlangsamte sich das Förderband, ja kam sogar vorübergehend zum Stillstand. Ein dramatischer Kälteeinbruch im gesamten Nordatlantik-Raum war die Folge. Sobald sich das Schmelz- mit dem Meerwasser vermischt hatte, setzte die ozeanische Zirkulation wieder ein. Dann strömten erneut warme tropische Wassermassen in hohe Breiten und sorgten für rasch steigende Temperaturen in Europa, Grönland und Nordamerika.

Die Erkenntnisse aus den vergangenen zwei Jahrzehnten haben unsere Vorstellung davon, wie sich das Klima auf unserem Planeten entwickelt, grundlegend verändert. Computermodelle sind jetzt das elementare Werkzeug, um die Funktionsweise des Klimasystems und das Zusammenspiel seiner Komponenten zu ergründen. Am LSCE habe ich eine Methode entwickelt, anhand des $^{18}O/^{16}O$-Verhältnisses planktonischer Foraminiferen, die in den obersten Wasserschichten leben, den Salzgehalt der marinen Oberflächenwässer in der Vergangenheit abzuschätzen. Ermittelt man durch eine statistische Analyse der fossilen Faunen nach dem Verfahren von Imbrie und Kipp zugleich die Wassertemperatur, ergibt sich die Dichte des Was-

Isotope und Eiskappen

Das Mengenverhältnis der Sauerstoff-Isotope mit den Massen 16 und 18 in fossilen Meerestieren kann dazu dienen, das Ausmaß früherer Vereisungen zu ermitteln. Die Wassermoleküle, die das leichte Isotop ^{16}O enthalten, verdunsten nämlich schneller als diejenigen mit dem schweren Isotop ^{18}O. Der Wasserdampf in der Atmosphäre ist deshalb mit ^{16}O angereichert – und damit auch der Schnee, der auf die Eiskappen fällt. Je mächtiger diese sind, desto mehr ^{16}O haben sie also gebunden und desto ärmer an ^{16}O – und folglich reicher an ^{18}O – ist das im Meer verbliebene Wasser. Die Isotopenverteilung im Meerwasser bestimmt aber – neben der Temperatur – das $^{18}O/^{16}O$-Verhältnis der Schalen von Foraminiferen, die darin leben. Nick Shackleton analysierte diese Schalen in Bohrkernen aus Regionen, wo die Wassertemperaturen nahe am Gefrierpunkt liegen und auch in der Vergangenheit nie höher gewesen sein dürften. Die erhaltenen Isotopenkurven spiegeln die Schwankungen des $^{18}O/^{16}O$-Verhältnisses im Ozean und damit das jeweilige Volumen der Eiskappen wider.



Ein weltweites ozeanisches Zirkulationssystem schaufelt wie ein riesiges Förderband warmes Wasser in den Nordatlantik (linke Seite). Wenn es erlahmt, brechen dort die Temperaturen ein, weil die Fernheizung durch das Meer ausfällt. Ein Indikator der Strömungsbedingungen im Atlantik sind die Isotopenverhältnisse des im Wasser gelösten Kohlendioxids, hier in einem Nord-Süd-Schnitt dargestellt (rechte Seite). Der Gehalt an Kohlenstoff-13 ist umso niedriger, je länger das Wasser vom Kontakt mit der Atmosphäre abgeschnitten war. Die höchsten ^{13}C-Werte treten im Nordatlantik auf, wo das Oberflächenwasser im Winter absinkt (die Pfeile deuten die Hauptrichtung der Tiefenwasserströmung an). Die heutigen Verhältnisse (links) wurden durch Messungen an Meerwasserproben ermittelt, die glazialen durch Analyse bodenlebender Foraminiferen aus Sedimentbohrkernen (rechts).

sers, die darüber entscheidet, wie bereitwillig es absinkt.

Mit Hilfe eines Modells, das meine Kollegen von der Katholischen Universität Louvain (Belgien) entwickelt haben, konnten meine Mitarbeiter und ich aus den so erhaltenen Daten das Ausmaß der ozeanischen Zirkulation in der Vergangenheit erschließen. Dabei ergab sich in großen Zügen das gleiche Bild, das Shackleton und ich zehn Jahre zuvor durch Analyse des ^{13}C-Anteils in bodenlebenden Foraminiferen rekonstruiert hatten. Die Simulationen zeigen ein aktives ozeanisches Förderband, wenn das Oberflächenwasser im Nordatlantik salzreich und kalt ist, und eine schwächere Zirkulation, wenn der Salzgehalt fällt und die Wassertemperatur steigt.

Unerklärliche Schneemengen

Mit Modellen der Luftzirkulation in der Atmosphäre gelingt es seit mehr als zwanzig Jahren, Klima-Extreme in der Vergangenheit wie das Maximum der letzten Vereisung zu simulieren. Dagegen schlugen noch bis vor kurzem alle Versuche fehl, auch Klimawechsel wie den Beginn einer Vereisung nachzuvollziehen. Erst vor zwei Jahren konnten Myriam Khodri und ihre Kollegen am LSCE mit einem Computermodell zeigen, dass die Abnahme der sommerlichen Sonneneinstrahlung in hohen nördlichen Breiten eine wesentliche Rolle spielt. Sie lässt die ozeanische Zirkulation erlahmen, wodurch die Nordmeere und die angrenzenden Kontinente auskühlen. Dabei sinken die Temperaturen schließlich so weit, dass der in Kanada und Skandinavien gefallene Schnee im Sommer nicht mehr schmilzt: Eine Inlandeisdecke beginnt zu wachsen.

Welche Punkte sind noch zu klären? Wissenslücken bestehen vor allem bei den Übergangszeiten. Insbesondere ist unklar, warum zu Beginn der Vereisungen jeweils so reichlich Schnee fiel, dass sich in weniger als 10 000 Jahren die gewaltigen Eismassen auf der Nordhalbkugel ansammeln konnten. Ein Schwachpunkt der Modelle ist auch, dass sie Veränderungen der Vegetation noch nicht berücksichtigen. Beispielsweise ging der Nordhalbkugel großflächig Sonnenenergie verloren, als der boreale Nadelwald einer Tundra wich, die mit ihrer höheren Albedo mehr Sonnenlicht ins All reflektiert. Und schließlich weiß man immer noch nicht, wie sich eine veränderte Sonneneinstrahlung auf der Nordhalbkugel im Sommer auf die Umverteilung der Wärme zwischen den Tropen, die den Großteil der Sonnenenergie abbekommen, und den höheren Breiten auswirkt.

Zu den wichtigsten Erkenntnissen der letzten zwanzig Jahre gehört, dass das irdische Klimasystem extrem empfindlich ist. Selbstverstärkungseffekte durch die Rückkopplung mit dem Ozean und der Vegetation bewirken, dass es heftig auf minimale Veränderungen der Energiebilanz in der Atmosphäre reagiert. Galt das auch in der ferneren Vergangenheit, als die Verteilung der Kontinente, die Höhe der Gebirgsketten und die ozeanische Zirkulation anders waren? Diese einstigen Welten müssen wir noch genauer erkunden, wenn wir die Funktionsweise der globalen Klimamaschine wirklich verstehen wollen. Wie konnte unser Planet zum Beispiel vor etwa 600 Millionen Jahren zu einem völlig zugefrorenen kosmischen »Schneeball« werden und wieder auftauen? Warum erhitzte er sich vor ungefähr 60 Millionen Jahren vorübergehend weltweit auf Saunatemperaturen? Nur durch die eingehende Analyse der ehemaligen Klimabedingungen sind wir letztlich im Stande, auch jene warme Welt im Detail vorherzusehen, die uns der massive Ausstoß von Treibhausgasen seit dem vergangenen Jahrhundert bescheren könnte. ◁

Jean-Claude Duplessy ist Forschungsdirektor am Laboratorium für Klima- und Umweltwissenschaften (CNRS/CEA) in Gif-sur-Yvette.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Grönlands eisiges Klimaarchiv. Von Richard B. Alley und Michael L. Bender in: Spektrum der Wissenschaft 4/1998, S. 50.

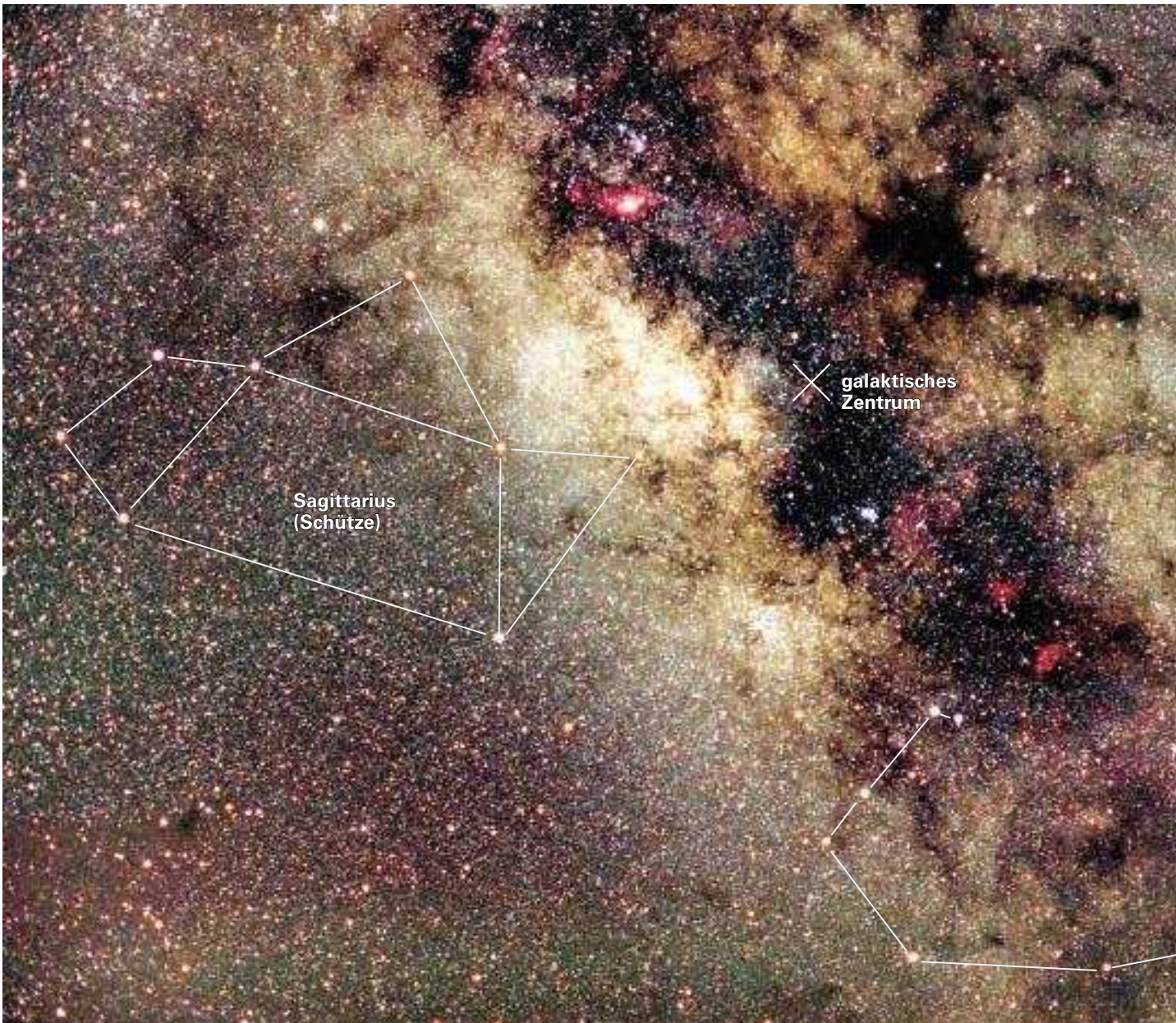
Ursachen der Vereisungszyklen. Von Wallace S. Broecker und George H. Denton in: Spektrum der Wissenschaft 3/1990, S. 88.

Erdbahn und Eiszeiten. Von Curt Covey in: Spektrum der Wissenschaft 4/1984, S. 84.

Weblinks zum Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Das Zentrum der Milchstraße

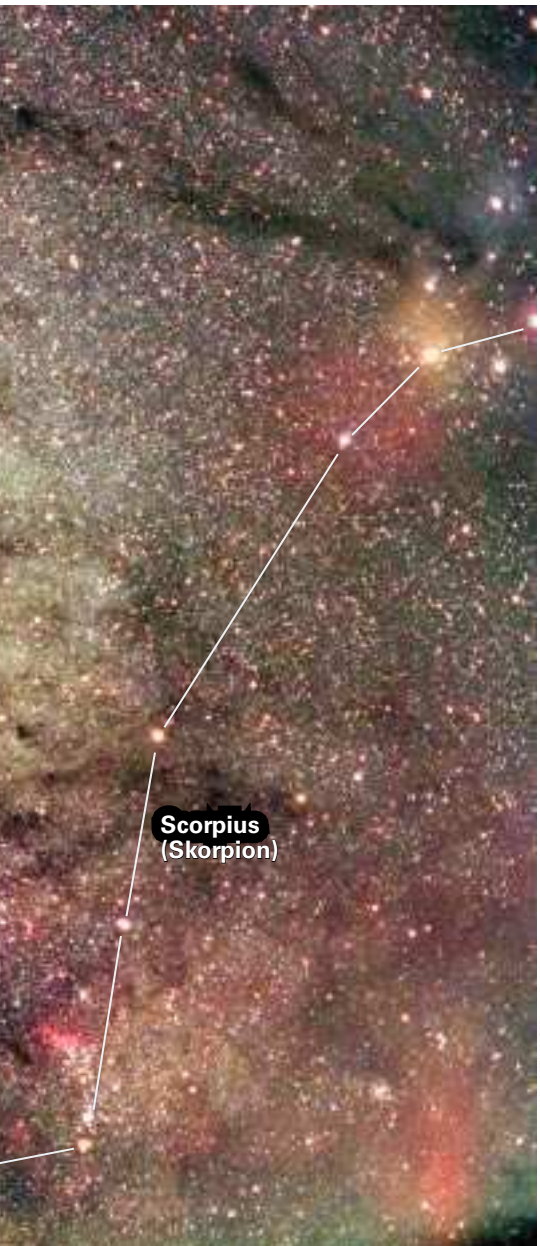
Inmitten unserer Galaxis lauert ein Schwarzes Loch auf neue Materie-Nahrung. Modernste Beobachtungstechniken verraten nicht nur das Vorhandensein dieses Massemonsters, sondern geben zugleich auch Einblick in die Verwandtschaft verschiedener Galaxientypen.



Von Wolfgang J. Duschl

Der deutsch-englische Astronom Friedrich Wilhelm Herschel (1738 – 1822) suchte als einer der Ersten die Struktur unseres Sternsystems quantitativ zu erfassen. Aus Zählungen der Lichtpunkte am nächtlichen Firmament folgerte der unermüdliche Beobachter, die Sonne stehe im Zentrum eines abgeflachten Gebildes. Der Durchmesser dieses Milchstraßensystems, der Galaxis, solle etwa fünfmal so groß sein wie seine Dicke.

Die Vorstellung einer scheibenförmigen Gestalt erwies sich als durchaus richtig. Doch erst in den dreißiger Jahren des 20. Jahrhunderts, 150 Jahre nach Herschels Feststellung, setzte sich die Erkenntnis allgemein durch, dass unsere Sonne zwar fast genau in der Zentralebene des Milchstraßensystems steht, aber keineswegs in dessen Zentrum. Von ihm ist sie – wie wir heute wissen – etwa 25 000 Lichtjahre entfernt.



AXEL MELLINGER

Das Zentrum unserer Galaxis liegt am Rand des Sternbilds Schütze – dort, wo sich im Band der Milchstraße die Sterne besonders dicht zusammenballen und Dunkelwolken die Sicht auf die dahinter liegenden Sterne verdecken.

Aber wenn schon nicht die Sonne in der Mitte der Galaxis steht, was dann? Um das herauszubekommen, mussten die Astronomen eine dicht von Sternen und interstellaren Wolken übersäte Region im Sternbild Schütze durchforschen, denn in dieser Richtung am Himmel befindet sich das galaktische Zentrum.

Unterstützung bekamen die Astronomen von unerwarteter Seite. Denn in die Zeit der 1930er Jahre, als sie allmählich ein klareres Bild vom allgemeinen Aufbau des Milchstraßensystems gewannen, fällt auch die Geburtsstunde der Radioastronomie. Per Radiowellen wurden damals bereits Nachrichten über lange Strecken übermittelt, zum Teil sogar schon über interkontinentale Distanzen. Um die Signalqualität zu verbessern, versuchten die Telefongesellschaften, Störquellen zu identifizieren und, wenn möglich, auszuschalten.

Der Ingenieur Karl Jansky (1905 – 1950) von den Bell Telephone Laboratories in New Jersey fand 1931 heraus, dass es neben allen möglichen irdischen Störungen – wie etwa Blitzen oder Zündungen von Fahrzeugmotoren – eine Störquelle gibt, die sich bestimmt nicht ausschalten lässt: Sie liegt nämlich außerhalb des Sonnensystems. Jansky registrierte besonders intensive Radiostrahlung aus der Richtung des Sternbildes Schütze – also genau von dort, wo die Astronomen inzwischen das Zentrum der Galaxis vermuteten. Aber auch entlang dem gesamten Band der Milchstraße konnte Jansky Radiostrahlung feststellen, wenn auch von geringerer Intensität. Der Ingenieur folgerte, dass sie von interstellarem Material und insbesondere von den Sternen kommen müsse.

Diese erste radioastronomische Beobachtung hatte allerdings bei den damaligen Astronomen, die gewohnt waren, im sichtbaren Licht zu beobachten, reichlich wenig Eindruck hinterlassen. Zudem mangelte es in den wirtschaftlich schwierigen Zeiten an Geld für neue Forschungsprojekte. So baute der Ingenieur Grote Reber (1911 – 2002) auf eigene Kosten ein Radioteleskop und machte sich auf seinem Anwesen in Chicago (Illinois) daran, die kosmischen Radiowellen zu erforschen. Im Jahr 1944 veröffentlichte er die erste richtige Radiokarte des Himmels – und bestätigte damit Janskys Entdeckungen.

Aus einem Vergleich der Helligkeit im optischen Spektralbereich und der von ihm beobachteten Radiostrahlung zog Reber eine interessante Schlussfolgerung: Falls die gesamte Radiostrahlung aus dem galaktischen Zentrum von Sternen stammte, müsste diese Himmelsregion im sichtbaren Licht genau so hell erscheinen wie die Sonne. Im Sternbild Schütze drängen sich zwar unzählige Sterne zusammen, aber die visuelle Strahlung von dort beträgt nur etwa ein Billionstel dessen, was uns von der Sonne erreicht. Ohne es zu ahnen – und genau genommen auf Grund falscher Vorstellungen über die Quelle der Radiostrahlung – hatte Reber schon erraten, wie stark das vom galaktischen Zentrum ausgehende Licht durch die dazwischen liegende interstellare Materie abgeschwächt wird.

Blick ins Dunkle

Auf Grund unserer Lage im Milchstraßensystem ist es gar nicht so einfach, dessen Struktur zu ermitteln. Ein Vergleich mit anderen Galaxien, die wir unter den verschiedensten Blickwinkeln von außen sehen können, hilft weiter. Heute wissen wir, dass unser Milchstraßensystem eine typische Spiralgalaxie ist. Die meisten Sterne befinden sich in einer flachen Scheibe mit einem Durchmesser von rund 100 000 und einer Dicke von etwa 2000 Lichtjahren. Die Scheibe ist in Spiralarme untergliedert, in denen sich helle Sterne und leuchtendes Gas konzentrieren (siehe Bild Seite 28 oben). Aber auch der Raum zwischen den Spiralarmen ist nicht leer: Er enthält fast ebenso viel Material, nur leuchtet es kaum. Der Zentralbereich der Galaxis wird von einer Verdickung der Sternverteilung geprägt, dem so genannten zentralen Bulge (englisch für »Ausbauchung« oder »Buckel«). Der Bulge ist nur relativ schwach abgeplattet und im Wesentlichen symmetrisch zur Scheibenebene.

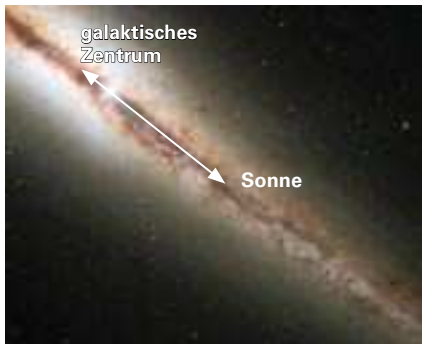
Unsere Galaxie enthält eine Masse von rund hundert Milliarden Sonnenmassen. Davon liegen rund zehn Prozent als interstellare Materie vor. Dieses Material besteht zu siebzig Prozent aus Wasserstoff und zu 28 Prozent aus Helium. Nur zwei Prozent entfallen auf alle anderen, schwereren Elemente, die knapp zur Hälfte als ▷

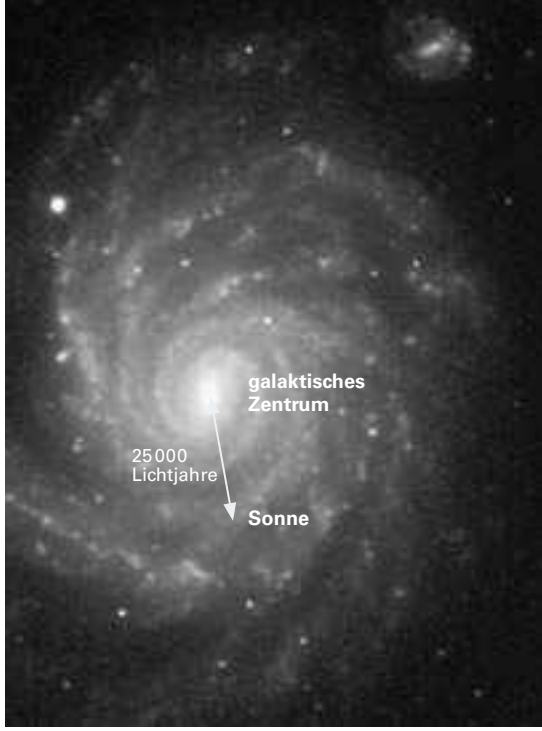
Staubteilchen auskondensiert sind. Diese Partikel haben einen typischen Durchmesser von einem Mikrometer und absorbieren sichtbares Licht besonders gut. Wie man von Spiralgalaxien weiß, die man – von unserer kosmischen Warte aus – von der Seite sieht, ist dieses absorbierende Material auf eine sehr dünne, nur wenige hundert Lichtjahre dicke Schicht in der galaktischen Ebene konzentriert. Da nun unsere Sonne und damit wir als Beobachter fast genau in dieser Zentralebene lokalisiert sind, wird unser Blick auf das Zentrum des Milchstraßensystems durch das absorbierende interstellare Material versperrt. Von einer Billion Lichtquanten, die vom galaktischen Zentrum in unsere Richtung ausgesandt werden, wird nur eines auf dem Weg zu uns nicht absorbiert. Deshalb erreicht uns nur ein Billionstel des von dort abgestrahlten sichtbaren Lichts. Das ist genau die Zahl, die schon Reber nannte – wenn auch ganz anders abgeleitet.

Demzufolge ist im sichtbaren Licht keine Information aus dem Zentrum der Galaxis zu gewinnen. Zum Glück aber schwächt interstellarer Staub elektromagnetische Strahlung nicht bei allen Wellenlängen gleich stark. Schon im infraroten Spektralbereich ist das Material viel durchsichtiger. Für eine Wellenlänge von 2,4 Mikrometern zum Beispiel, die etwa dem Dreifachen der Wellenlänge von rotem Licht entspricht, gelangt ein Fünfzehntel der Strahlung ungehindert hindurch. Das ist zwar immer noch eine beachtliche Absorption, aber jetzt werden zumindest die helleren Sterne im galaktischen Zentrum der Beobachtung zugänglich.

Allerdings haben die Astronomen hier mit zwei gegenläufigen Prozessen zu kämpfen: Der immer besseren Durchsichtigkeit des Materials zu größeren Wellenlängen hin steht nämlich die immer geringere Strahlung der Sterne gegenüber. Bereits bei einer Wellenlänge von sieben Mikrometern überwiegt in der Regel die Strahlung des interstellaren Materials diejenige der Sterne.

Das Verständnis der Zentren normaler Galaxien entwickelte sich von einer überraschenden Seite her, nämlich von den so





BEIDE FOTOS: NASA / HST

Unser Milchstraßensystem ist eine typische Spiralgalaxie. Die Sonne befindet sich in der Zentralebene in einem der Spiralarme, ist aber etwa 25000 Lichtjahre vom galaktischen Zentrum entfernt. Zur Illustration dienen hier die Galaxien NGC 4013 (unten) und NGC 1232.

genannten »aktiven galaktischen Kernen« (*active galactic nuclei*, AGN). Der US-Astronom Carl Seyfert (1911–1960) fand in der ersten Hälfte der 1940er Jahre einige Spiralgalaxien mit außergewöhnlich hellem und kompaktem Zentralbereich, der den Rest des Sternsystems überstrahlte. Inzwischen wissen wir, dass etwa zehn Prozent aller Spiralgalaxien einen solchen aktiven Kern haben. Wo diese enorme Leuchtkraft herkommen sollte, war zunächst völlig unklar.

Schwarze Löcher in allen Galaxienzentren?

Noch unverständlicher wurde die Situation etwa zwanzig Jahre später. An der Position mancher Radioquellen am Himmel war auf optischen Aufnahmen nur ein Lichtpunkt zu erkennen, so als ob es sich um einen Stern handelte. Diese Objekte – quasistellare Radioquellen oder kurz Quasare genannt – mussten aber ihren Spektren zufolge sehr weit entfernt sein. Damit wiederum mussten sie extrem hell strahlen – einige von ihnen mindestens zehntausend Mal heller als unser gesamtes Milchstraßensystem. Heute wissen die Astronomen, dass Quasare eine extreme Form aktiver Galaxien sind, die hauptsächlich in einer sehr frühen Entwicklungsphase des Universums vorkamen. Diese Energieschleudern ändern zudem ihre Helligkeit oft binnen weniger Monate oder gar Wochen. Folglich muss die Quelle der Energie kleiner sein als etwa ein Lichtjahr, also auf das unmittelbare Zentrum der Galaxien konzentriert sein.

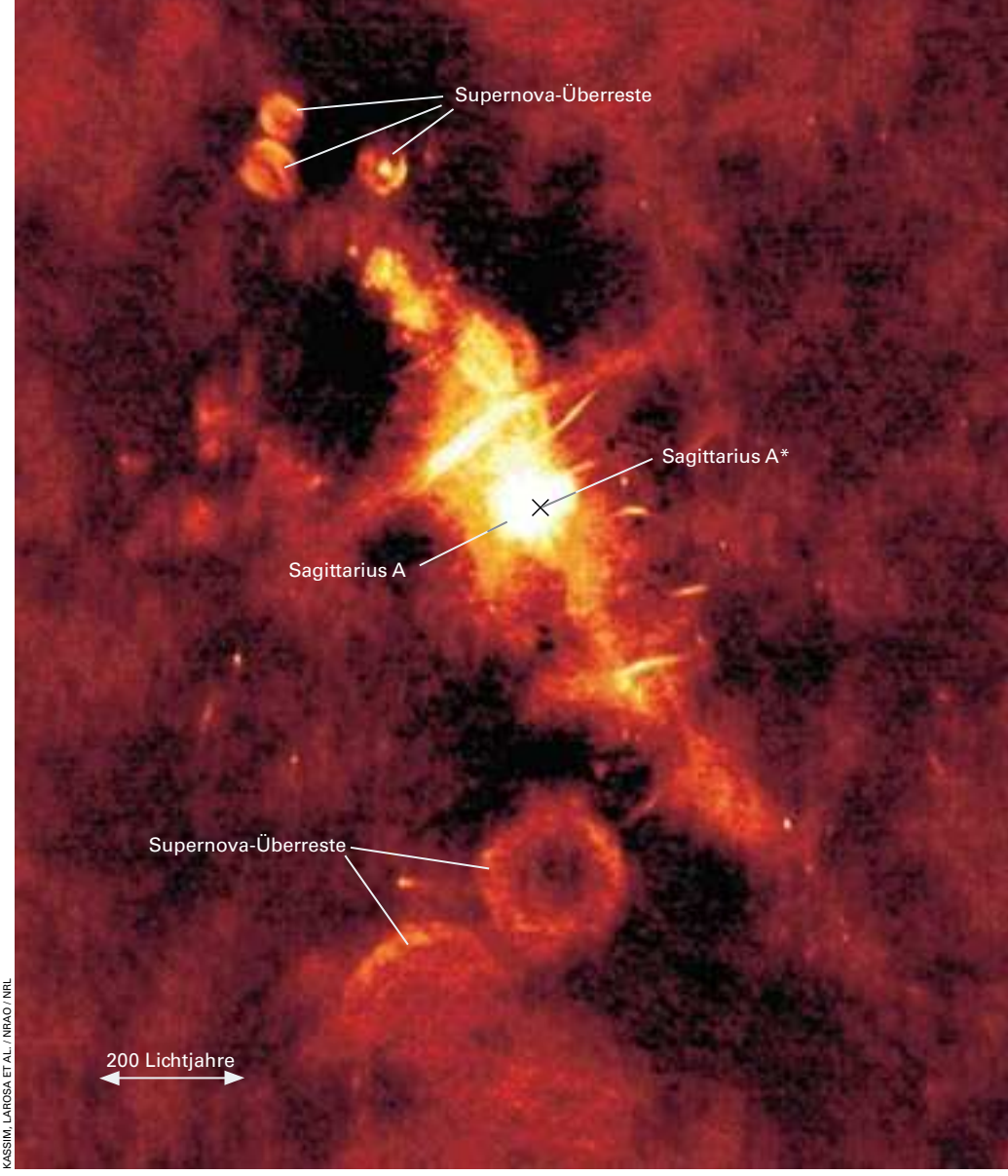
Welcher Mechanismus kann solche extremen Energiemengen erzeugen? Die Astronomen erkannten bald, dass normale Sternstrahlung, so wie wir sie von unserer Sonne kennen, nicht ausreichte. Ein weit effektiverer Prozess musste da am Werke sein. Erst um 1970 herum begann sich die Erkenntnis durchzusetzen, dass in den aktiven galaktischen Kernen Materie in ein Schwarzes Loch fällt, wobei große Mengen an Gravitationsenergie freigesetzt werden.

Schwarze Löcher sind die kompaktesten Gebilde, die wir kennen. Eines mit der Masse der Sonne zum Beispiel hätte einen Durchmesser von nur drei Kilometern. Entsprechend stark wäre die Anziehungskraft in der Nähe eines solchen Schwarzen Loches und entsprechend viel Gravitationsenergie stünde zur Verfügung. Die Frage, die sich nun stellte, war: Gibt es Schwarze Löcher womöglich in allen Galaxienzentren? Es könnte ja sein, dass nur manche dieser massereichen Zentralobjekte im Moment Materie aufsaugen, alle anderen aber keine oder nur sehr wenig. Erstere Gruppe wäre dann die der aktiven galaktischen Ker-

NASA / HST

NASA / CXC

Zweimal dasselbe Himmelsareal: Während im sichtbaren Licht in der Umgebung des Quasars PKS 1127-145 mehrere Galaxien zu sehen sind (links), dominiert im Röntgenbereich der Quasar und ein von ihm ausgehender Jet.



KASSIM, LAROSA ET AL. / NRAO / NRL

Im Radiowellenbereich offenbart sich die Umgebung des galaktischen Zentrums als Stätte dramatischer Ereignisse. Viele der blasenförmigen Radioquellen sind die Überreste von Supernova-Explosionen. Das galaktische Zentrum selbst fällt mit einer punktförmigen Radioquelle zusammen, Sagittarius A*, die von einer ausgedehnteren Quelle, Sagittarius A, umgeben ist. Das Bild wurde bei einer Wellenlänge von neunzig Zentimetern aufgenommen.

ne, Letztere, in denen keine solche Energiequelle tätig ist, die der normalen Galaxien.

Ein Schwarzes Loch als solches zu identifizieren erfordert also, seine Masse und seine Größe festzustellen. Beides ist in den letzten Jahren für das Zentrum des Milchstraßensystems gelungen. Unsere eigene Galaxie eignet sich hierfür weit besser als die nächste vergleichbare Spiralgalaxie, der Andromeda-Nebel. Denn mit einem gegebenen Instrument ist für die Umgebung des galaktischen Zentrums eine um fast zwei Größenordnungen bessere räumliche Auflösung möglich als für die rund hundertmal weiter entfernte Andromeda-Galaxie. Darum ist – trotz der beschriebenen Probleme mit der Staubabsorption – unsere Beobachtungsposition doch nicht so schlecht.

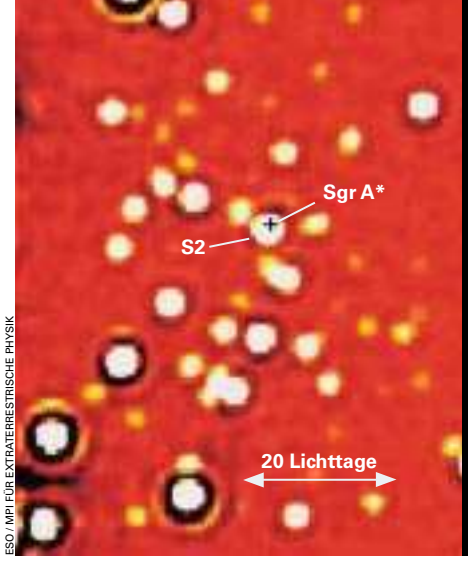
Um herauszufinden, welches Objekt sich im Herzen der Milchstraße verbirgt, muss zunächst einmal seine Masse bestimmt werden. Prinzipiell geht das recht einfach, technisch ist es jedoch ein sehr aufwendiges und langwieriges Verfahren.

Wiegen eines Massemonsters

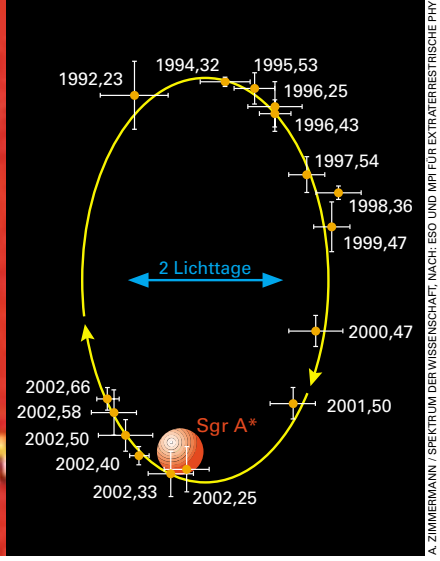
Grundlage ist eines der Gesetze der Planetenbewegungen, das Johannes Kepler im Jahr 1619 erkannt hat: Das Quadrat der Umlaufszeit eines Planeten ist der dritten Potenz seiner Entfernung zur Sonne proportional. Nachdem Ende des 17. Jahrhunderts der Engländer Isaac Newton den physikalischen Hintergrund dieser Beziehung in Form des Gravitationsgesetzes formulierte, wurde klar, dass sie nicht nur für das Sonnensystem gilt und dass die Proportionalitätskonstante zwischen Umlaufszeit und Abstand von der Masse des Zentralobjekts abhängt, um den ein Himmelskörper kreist. Streng genommen spielen auch die Massen aller übrigen Körper im betrachteten Planeten- oder Sternsystem eine Rolle, aber zumindest im Falle des Sonnensystems darf man sie in erster Näherung vernachlässigen. Somit kann man durch Messung von Abstand und Umlaufszeit eines Himmelskörpers die Masse des Zentralobjekts bestimmen, das er umrundet.

Genau dieses Verfahren wenden die Astronomen auch für das Zentrum der Galaxis an. Doch im Gegensatz zum Sonnensystem können sie die Situation hier nicht auf zwei punktförmige Himmelskörper reduzieren. Für eine genaue Rechnung müssen sie die so genannte Poisson-Gleichung lösen, die beschreibt, wie die Massen-Verteilung mit der Anziehungskraft zusammenhängt. Das Prinzip ist aber wiederum recht einfach zu verstehen. In erster Näherung wird die Umlaufszeit eines Sterns oder eines Gasklumpens um das Zentrum von der Masse innerhalb seiner Bahn abhängen. Das sagt jedoch noch nichts darüber aus, wie diese Masse verteilt ist – sie könnte gleichmäßig innerhalb der Bahn »ausgeschmiert« sein oder aber – wie im Falle des Sonnensystems – auf eine dominierende Masse im Zentrum konzentriert sein. Aber auch das lässt sich untersuchen. Die Astronomen verwenden dazu Sterne in unterschiedlicher Entfernung zum galaktischen Zentrum und nutzen den Umstand, dass die innerhalb einer Bahn eingeschlossene Masse nicht zunehmen kann, wenn die betrachteten Bahnen kleiner werden.

Die Umlaufszeiten von Gas und Sternen um das galaktische Zentrum direkt zu bestimmen würde in den meisten Fällen viel zu lange dauern. Gleichwertig ist es aber, die Geschwindigkeiten zu messen. Und genau das machen die Astronomen seit einigen Jahren (siehe Spektrum der Wissenschaft 6/1990, S. 76). In dem Maße, in dem sie die Technik verbesserten, konnten sie sich immer näher an das Zentrum herantasten. Die gemessenen Geschwindigkeiten und die daraus abgeleiteten Massen verhalten sich wie erwartet: Je kleiner die Abstände der untersuchten Materie vom mutmaßlichen Zentrum, um so kleiner sind die in ihrer Bahn eingeschlossenen Massen. Anfangs, bei den größten untersuchten Radien, waren die Resultate noch damit verträglich, dass im galakti- ▷



ESO / MPI FÜR EXTRATERRESTRISCHE PHYSIK



A. ZIMMERMANN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: ESO UND MPI FÜR EXTRATERRESTRISCHE PHY

Fortschritte in der Beobachtungstechnik ermöglichten es, die Bahnbewegungen einiger weniger Sterne um das dynamische Zentrum der Galaxis direkt zu messen. Der Stern S2 umrundet das zentrale Schwarze Loch, das durch Sagittarius A* (Sgr A*) repräsentiert wird, in etwa 15 Jahren. Die kürzeste Distanz zwischen beiden Objekten beträgt etwa 17 Lichtstunden, das entspricht dem dreifachen Abstand des Planeten Pluto von der Sonne.

schen Zentrum nichts Besonderes stünde – vielleicht ein paar Sterne, ein Sternhaufen, oder sonst etwas relativ Normales.

Der eigentliche Durchbruch gelang, als Anfang der 1990er Jahre die Untersuchung einzelner Sterne möglich wurde. Hier leistete die Gruppe um Reinhard Genzel und Andreas Eckart am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching die entscheidende Pionierarbeit. Über mehrere Jahre hinweg fotografierte die Gruppe immer wieder die unmittelbare Umgebung des galaktischen Zentrums im infraroten Spektralbereich. Hierzu nutzte sie ein Teleskop der Europäischen Südsternwarte Eso in Chile. Die Bildserie zeigte, dass sich einzelne der Sterne merklich bewegen. Indem zusätzlich auch die Geschwindigkeiten der Sterne entlang unserer Blickrichtung gemessen wurden, ließ sich die Bahnbewegung dieser Himmelskörper vollständig rekonstruieren. Es zeigte sich: Je näher sie am galaktischen Zentrum stehen, umso schneller vollführen sie ihren Umlauf – ganz so, wie es den Kepler-Gesetzen entspricht.

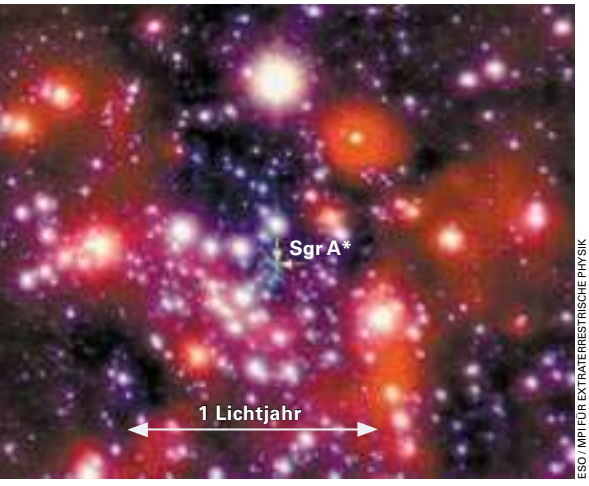
Damit konnten die Astronomen nun die innerhalb der jeweiligen Sternbahnen eingeschlossene Masse mit bis dahin unerreichter Genauigkeit bestimmen. Dabei ergab sich innerhalb eines Gebiets von etwa drei Lichtjahren Durchmesser stets der gleiche Wert. Demnach ähnelt die Situation dort unserem Sonnensystem: Es scheint einen Zentralkörper zu geben, dessen Gravitation die Kräfteverhältnisse dominiert und der sehr viel kleiner ist als die Sternbahnen. Die Messungen weisen auf ein Objekt von etwa 2,5 Millionen Sonnenmassen hin, das viel kleiner ist als ein zehntel Lichtjahr. Die Arbeiten der Garchinger Astronomen wurden inzwischen von der Gruppe um Andrea Ghez von der Universität von Kalifornien in Los Angeles mit dem Keck-Teleskop in Hawaii unabhängig wiederholt und führten zu einem damit übereinstimmenden Ergebnis.

Radiosignale aus dem Herzen der Galaxis

Damit war das Problem eigentlich gelöst: Ein Gebilde, das eine derartig große Masse aufweist, aber dennoch so klein ist, kann nach unserem heutigen Wissen nur ein Schwarzes Loch sein. Zwar könnte ein geringer Teil dieser Masse durchaus in Form von Sternen oder Gas vorliegen. Doch die gigantische Zentralmasse mit einem kompakten Sternhaufen oder gar mit Gaswolken erklären zu wollen, ist nicht möglich. Ein Sternhaufen wäre entweder schon seit langem auseinander geflogen, wofür es keinerlei Indizien gibt, oder schon längst kollabiert – und zwar zu einem Schwarzen Loch. Eine Gaswolke wäre ebenfalls instabil und hätte unter diesen Bedingungen dasselbe Schicksal erlitten. Wenn man keine neue Physik erfinden will – und dafür besteht nicht der geringste Bedarf –, dann ist die Interpretation, dass im Zentrum der Galaxis ein Schwarzes Loch von etwa 2,5 Millionen Sonnenmassen steht, die plausibelste Erklärung der Beobachtungen.

Was aber können wir über das rätselhafte Schwarze Loch sonst noch herausfinden? Selbst auf den Infrarotaufnahmen, auf denen einige helle Sterne zu sehen sind, ist am Ort des galaktischen Zentrums nichts zu erkennen. Da aber die Absorption des interstellaren Staubes mit zunehmender Wellenlänge kleiner wird, können uns Beobachtungen im Radiowellenbereich weiterhelfen. Genau an der Stelle, wo wir heute das zentrale Schwarze Loch vermuten und wo sich das dynamische Zentrum des Milchstraßensystems befindet, wurde Mitte der 1970er Jahre eine punktförmige Radioquelle entdeckt. Die Astronomen nennen sie Sagittarius A* (gesprochen: »A Stern«) nach dem Sternbild Schütze (Sagittarius) und weil sie eine Punktquelle innerhalb des ausgedehnteren Radiokomplexes Sagittarius A ist. Das Spektrum von Sagittarius A*, das in den letzten Jahren im Detail untersucht wurde, weist im Wesentlichen eine recht einfache Form auf: Über einen weiten Wellenlängenbereich – vom fernen Infraroten bis zu einer Wellenlänge von knapp einem halben Meter – ist sein Verlauf durch ein Potenzgesetz zu beschreiben. Zusätzlich ist zwar eine Detailstruktur zu erkennen, und die Helligkeit von Sagittarius A* ist auch nicht völlig konstant. Dennoch scheint die zu Grunde liegende Physik recht einfach zu sein.

Offenbar beobachtet man hier das Spektrum von Elektronen, die sich in einem für kosmische Verhältnisse relativ starken Magnetfeld bewegen. Interessanterweise scheinen die Elektronen alle eine recht ähnliche Energie zu haben. Ob eine



ESO / MPI FÜR EXTRATERRESTRISCHE PHYSIK

Diese Infrarot-Aufnahme mit dem 8,2-Meter-Teleskop Yepun des Very Large Telescope in Chile zeigt zahlreiche heiße Sterne in der Umgebung von Sagittarius A* (Pfeile). Das hier rötlich dargestellte diffuse Leuchten stammt von interstellarem Staub.

solche quasi-monoenergetische Elektronenverteilung typisch für die Zentren von Galaxien ist, lässt sich noch nicht eindeutig sagen, da Beobachtungen mit einer hinreichend hohen räumlichen Auflösung in anderen galaktischen Kernen sehr schwierig sind. Zumindest findet man dort, wo solche Beobachtungen möglich sind, auch sehr ähnliche Spektren.

Winzling mit zentraler Rolle

Anhand des Radiospektrums von Sagittarius A* können die Theoretiker nun Aussagen über verschiedene Eigenschaften der Quelle treffen, so etwa über die Stärke des Magnetfeldes, die Dichte der Elektronen und auch über die Größe des Gebietes, das die Strahlung emittiert. Gemeinsam mit Kollegen vom Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn hat meine Gruppe an der Universität Heidelberg solche Rechnungen durchgeführt. Unserem Modell zufolge stammt die Strahlung von Sagittarius A* aus einem Gebiet, das nicht größer als rund hundert Millionen Kilometer sein kann. Für kosmische Verhältnisse ist das winzig. Diese Zahl wird aber noch auffälliger, wenn man sie mit dem vergleicht, was wir bereits über die Masse von Sagittarius A* wissen: Ein Schwarzes Loch von 2,5 Millionen Sonnenmassen muss einen Durchmesser von 7,5 Millionen Kilometern haben. Das wäre also nur eine Größenordnung kleiner als unsere aus Modellrechnungen gefundene obere Grenze. Astronomen vom Max-Planck-Institut für Radioastronomie ist es inzwischen sogar gelungen, die Größe der Radioquelle Sagittarius A* direkt zu messen. Ihre Ergebnisse haben unsere theoretisch vorhergesagten Resultate bestätigt. Was wir im Radiowellenbereich sehen, ist also nichts anderes als Strahlung von Elektronen aus einer Materiewolke, die das Schwarze Loch umgibt.

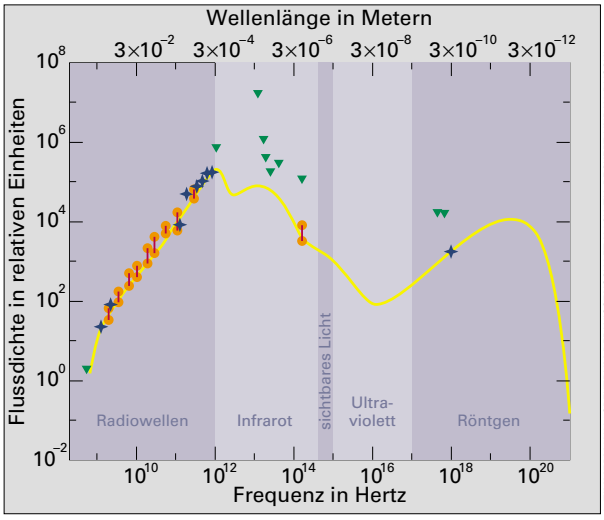
Mit Hilfe von Satelliten, die von außerhalb der störenden Erdatmosphäre beobachten, konnte Sagittarius A* auch als Röntgenquelle identifiziert werden. Kürzlich registrierten die Detektoren sogar einen starken Anstieg der Helligkeit in diesem hochenergetischen Spektralbereich: Binnen weniger Stunden nahm die ausgesandte Röntgenstrahlung um fast das Fünfzigfache zu. Vermutlich ist diese Aktivität auf Materie zurückzuführen, die durch die enorme Schwerkraft in das Schwarze Loch hineingesogen wird.

Die Sterne, deren Bewegung Aufschlüsse über die Masse des Schwarzen Loches gegeben haben, befinden sich momentan noch in recht sicherer Entfernung von diesem Mahlstrom. Sie sind Mitglieder eines zentralen Sternhaufens, der Sagittarius A* umgibt. Dieser hat einen Durchmesser von rund zehn Lichtjahren und geht einigermaßen kontinuierlich in eine flache Sternscheibe im Kernbereich der Galaxis über, die rund 700 Lichtjahre breit und etwa 150 Lichtjahre dick ist. Im zentralen Sternhaufen selbst ballen sich Sterne mit dem Zehnmillionenfachen der Sonnenmasse zusammen. Im Grunde unterscheiden sich diese Sterne und ihre Verteilung aber nicht wesentlich von den übrigen Gebieten des Milchstraßensystems – mit einer Ausnahme: Anscheinend hat die Zentralregion unserer Galaxis vor einigen Dutzend Millionen Jahren eine Phase besonders intensiver Sternentstehung durchlaufen.

In den inneren rund 700 Lichtjahren des Milchstraßensystems befinden sich – eingebettet zwischen den Sternen – riesige Molekülwolken, die zusammen eine Masse von rund 15 Millionen Sonnenmassen aufweisen. Man kann sie sowohl im infraroten Spektralbereich als auch im Radiowellenbereich erkennen. Im Infraroten fallen sie dadurch auf, dass sie das Licht von Sternen, die – von uns aus gesehen – hinter ihnen liegen, abschwächen oder sogar ganz verschlucken. An diesen Stellen weist die Sternverteilung also scheinbar Lücken auf. Dass diese Lücken nicht real sind, sondern nur vorgetäuscht, ergibt sich durch Vergleich mit Beobachtungen im Radiowellenbereich. Denn die Molekülwolken senden Radiostrahlung aus. Die dunklen Gebiete in den Infrarot-Aufnahmen sind demnach tatsächlich Materiewolken, die das Licht von dahinter liegenden Quellen abschwächen. ▷

Das Spektrum von Sagittarius A*

Wegen der starken Absorption der interstellaren Materie, welche die Sicht auf das galaktische Zentrum behindert, kann das Spektrum von Sagittarius A* nur in bestimmten Frequenz- beziehungsweise Wellenlängenbereichen direkt gemessen werden. Wie Radioastronomen herausfanden, folgt das Spektrum im Mikrowellenbereich einem Potenzgesetz (orange und blaue Messpunkte). Im Infraroten und im Röntgenbereich können nur obere Grenzen der Flussdichte ermittelt werden (grüne Dreiecke). Die Flussdichte ist zudem veränderlich, wie durch die vertikalen Punktpaare angedeutet. Die gelbe Kurve ist aus theoretischen Modellen abgeleitet.



A. ZIMMERMANN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: TH. BECKERT UND W. DUSCHL

▷ Die innige Durchdringung von Sternen und Gaswolken ermöglicht übrigens ein pfiffiges Verfahren, mit dem sich die räumliche Lage der Wolken feststellen lässt. Himmelsaufnahmen – ganz gleich in welchem Spektralbereich und mit welchen Instrumenten auch immer – zeigen uns zwar die Richtung, in der ein Objekt liegt, sagen aber gewöhnlich nichts über die Entfernung aus. Und von den Sternen und Molekülwolken im Zentrum des Milchstraßensystems wissen wir zunächst nur, dass sie alle rund 25 000 Lichtjahre von uns entfernt sind. Wie sie aber genau zueinander liegen, ist zunächst nicht klar. Eine Methode, die unser Team aus Heidelberg und Bonn gerade entwickelt, besteht nun darin, aus der absorbierenden Eigenschaft des Materials die Lage zu rekonstruieren.

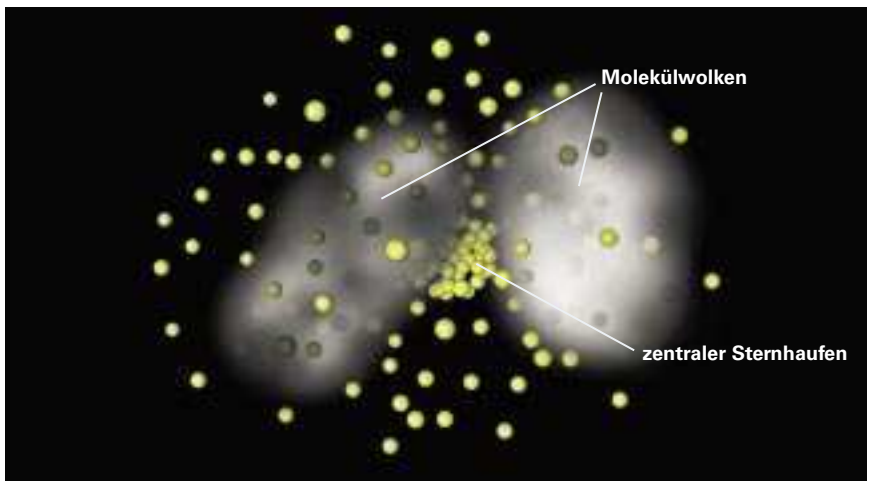
Schlafender Vulkan

Wenn man weiß, wie die Sterne eigentlich verteilt sind, dann kann man auch feststellen, wo das absorbierende Material innerhalb dieser Sternverteilung liegen muss. Im Prinzip muss man nur miteinander vergleichen, wie viele Sterne an einer bestimmten Stelle zu sehen sind, und wie viele man sehen müsste, wenn keine Absorption da wäre. Der Unterschied ist die Zahl der Sterne, die von uns aus gesehen hinter der Molekülwolke liegen müssen und deren Licht von der Wolke absorbiert wird. Ein Vergleich der so ermittelten Zahlen mit der ungestörten Verteilung ergibt dann die Position der Wolke innerhalb der Sternverteilung (siehe Grafik unten).

Es geht aber auch noch anders: Da die Wolken im Radiowellenbereich strahlen, kann man ihre Bewegung anhand des Doppler-Effekts ermitteln. Die Strahlung von Material, das auf uns zukommt, ist zu kürzeren Wellenlängen verschoben, diejenige von Materie, die von uns wegfliegt, zu längeren. Damit kennt man zwar zunächst nur die Geschwindigkeit in Beobachtungsrichtung, wohingegen die lokale Bewegung des Gases im Einzelnen gewiss viel komplizierter ist. Aber die großräumige Bewegung folgt einem einfachen Muster: Die Wolken ziehen im Wesentlichen auf Kreisbahnen, denen eine im Vergleich dazu langsame Strömung auf das galaktische Zentrum hin überlagert ist. Da man inzwischen die Massenverteilung in dieser Region kennt und überdies weiß, wie groß die Umlaufgeschwindigkeiten für unterschiedliche Abstände sind, kann man aus den Geschwindigkeitsmessungen auf die Lage der Molekülwolken rückschließen. Dabei stellte sich heraus, dass das Material auf das Zentrum des Milchstraßensystems zu strömt. Diese Dynamik bleibt für die Entwicklung jener Region gewiss nicht ohne Folgen. Wie machen sich diese bemerkbar?

Schauen wir uns dazu noch einmal in anderen Galaxien um. Ursprünglich kam ja die Vermutung, in den Zentren von Galaxien könnten sich Schwarze Löcher befinden, von den aktiven galaktischen Kernen her. Im Falle unseres Milchstraßensystems hat sich das eindeutig bestätigt. Auch für andere Galaxien scheint es der Normalfall zu sein, dass sich in ihrem Innersten jeweils ein Schwarzes Loch verbirgt. Die Massen dieser Zentralobjekte betragen üblicherweise zwischen wenigen Millionen und mehreren Dutzend Millionen Sonnenmassen. War es vor nicht allzu langer Zeit noch so, dass man erstaunt war, in den Zentren normaler Galaxien Schwarze Löcher zu finden, so ist es inzwischen genau umgekehrt.

Man wundert sich eher, wenn im Zentrum einer Galaxie kein solches Gebilde gefunden wird, und fragt sich, was bei der Entwicklung dieses Sternsystems wohl schief gegangen sein könnte. Es deutet sogar inzwischen einiges darauf hin, dass die Entwicklung des Schwarzen Loches und diejenige der Sternverteilung im Innersten von Galaxien eng miteinander verbunden sind. Die Astronomen haben nämlich Zusammenhänge zwischen der Masse des Schwar-



A. ZIMMERMANN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Astronomen versuchen zurzeit, die räumliche Lage von Molekülwolken in der Umgebung des galaktischen Zentrums zu rekonstruieren. Dabei nutzen sie die absorbierenden Eigenschaften der Wolken, die einen Teil der Sterne verdecken.

NASA / HST

Durch den nahen Vorübergang oder gar eine Kollision von zwei Galaxien werden die Sternsysteme stark erformt. Dabei kann viel Gas in die Zentralbereiche geschleudert werden, wodurch das zentrale Schwarze Loch neue Nahrung erhält und sich zu einem Quasar entwickeln kann.

zen Loches und der Geschwindigkeitsverteilung der Sterne gefunden. Es würde sehr überraschen, wenn das nur ein Zufall ohne tieferen physikalischen Grund wäre.

Ein enormer Unterschied besteht indes zwischen aktiven und normalen galaktischen Zentren. Aktive galaktische Kerne zeichnen sich durch ihre sehr hohe Leuchtkraft aus. Ihre Energie beziehen sie aus Gas, das in das Schwarze Loch strömt. Die Ausbeute ist dabei natürlich umso größer, je mehr Masse pro Zeiteinheit hineinfällt. Wenn wir also ein galaktisches Zentrum vor uns haben, das nur wenig Strahlung aussendet, dann deutet das darauf hin, dass diese Energiequelle nicht zur Verfügung steht, dass also gegenwärtig kein Material in das Schwarze Loch hineinströmt.

Ist also der Unterschied zwischen normalen Galaxien und aktiven galaktischen Kernen nicht von generischer Natur, sondern nur auf zwei verschiedene Zustände in ansonsten ähnlichen Gebilden zurückzuführen? Wir kennen so etwas auch von anderen Phänomenen: Ein Vulkan ist auch dann ein Vulkan, wenn er gerade nicht ausbricht. Galaxien scheinen sich ähnlich zu verhalten. Das zeigt zum Beispiel das Ensemble der Molekülwolken im Zentrum unseres Milchstraßensystems, das sich nicht nur um das Schwarze Loch bewegt, sondern sich ihm auch langsam nähert. Irgendwann wird dieses Material beim Schwarzen Loch ankommen und dann auch dort hineinfallen. Wie wir in Heidelberg abschätzen konnten, wird das in einigen zehn Millionen Jahren so weit sein. Dann ist eine heftige Aktivitätsepisode zu erwarten und das Zentrum unseres Milchstraßensystems wird dann für geraume Zeit wieder als aktiver galaktischer Kern erstrahlen.

In den kollidierenden Galaxien Arp 220 sind die beiden hellen Zentren nur noch 1200 Lichtjahre voneinander entfernt. Irgendwann werden sie verschmelzen und als heller Quasar erstrahlen.

NASA / HST

In diesem Lichte gewinnt auch die Beobachtung, dass etwa ein Zehntel aller Galaxien einen aktiven galaktischen Kern aufweist, an Bedeutung. Vorausgesetzt, so gut wie alle Galaxien haben massereiche Schwarze Löcher in ihren Zentren, dann bedeutet das nichts anderes, als dass jede Galaxie zu etwa einem Zehntel der Zeit aktiv ist und sich zu neunzig Prozent der Zeit wie eine normale Galaxie von der Art des Milchstraßensystems verhält.

Wenn wir jetzt noch betrachten, wie viel Material während dieser Aktivitätsphasen in das Zentrum strömt, dann ergibt sich ein konsistentes Bild. Über ihre gesamte Lebenszeit von rund zehn Milliarden Jahren können in unserer Galaxis nur wenige Millionen Sonnenmassen an Materie in das Zentrum gefallen sein – was sehr gut zu der heute beobachteten Masse des zentralen Schwarzen Loches passt. Offenbar sparen sich Galaxien die Massen ihrer Schwarzen Löcher in den immer wieder auftretenden Aktivitätsphasen nach und nach zusammen. Dann wäre es nicht verwunderlich, dass fast alle Galaxien massereiche Schwarze Löcher aufweisen.

Bleibt schließlich noch die Frage, wie die Quasare in dieses Bild passen. Hier scheint die einfache Entwicklungssequenz nicht zu funktionieren. Quasare haben schon sehr früh im Universum sehr massereiche Schwarze Löcher: Die Extremfälle erfordern Milliarden von Sonnenmassen schon zu einem Zeitpunkt, als das Universum nur einige hundert Millionen Jahre alt war. Wenn man sich die Quasare aber genauer ansieht, insbesondere ihre Muttergalaxien, dann fällt auf, dass viele von ihnen – möglicherweise sogar alle – gerade eine Kollision mit einer anderen Galaxie durchmachen oder durchgemacht haben. Während dieses Vorgangs kann sehr schnell sehr viel Gas in die Zentren der verschmelzenden Galaxien getrieben werden.

Wechselwirkungen zwischen Sternsystemen sind zwar nicht nur bei Quasaren zu beobachten. Aber es könnte sein, dass Quasare lediglich dann entstehen, wenn zwei ähnlich große Galaxien tatsächlich miteinander verschmelzen. In der Frühzeit des Universums, als sich die Galaxien gerade entwickelten und noch viel näher beieinander standen als heute, ist das relativ häufig passiert. Die meisten Sternsysteme haben indes weniger starke Wechselwirkungen erfahren, indem sie knapp aneinander vorbeigeschrammt oder nur mit viel kleineren Galaxien kollidiert sind. Sie wurden dann zu dem, was man heute entweder als normale Galaxie oder als einen aktiven galaktischen Kern betrachten würde.

Wenn dem so ist, dann wären Quasare tatsächlich etwas anderes als normale Galaxien oder aktive galaktische Kerne. Die beiden Letzteren scheinen aber tatsächlich nur verschiedene Zustände ansonsten sehr ähnlicher Gebilde zu sein. All das wurde in den letzten Jahren dadurch immer klarer, dass die Astronomen gelernt haben, die Physik des Milchstraßenzentrums immer besser zu verstehen und im Vergleich zu anderen Galaxien einzuordnen. ◁

Wolfgang J. Duschl forscht am Institut für Theoretische Astrophysik der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, wo er seit 1997 eine Professur innehat. Nach seinem Studium an der Ludwig-Maximilians-Universität München war er zunächst am Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching tätig. Gastaufenthalte führten ihn ans Institut für Astronomie der Universität Cambridge und ans Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn.

Where Have All the Black Holes Gone? Von Thomas Beckert und Wolfgang J. Duschl in: Astronomy and Astrophysics, Bd. 387, S. 422 (2002).

The Central Parsecs of the Galaxy. Von H. Falcke et al. (Hg.). Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 1999.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Impfen gegen

Sie sind selten und doch unverzichtbar: die dendritischen Zellen. Erst seit kurzem beginnen Wissenschaftler ihre zentrale Rolle bei der Immunabwehr genauer zu verstehen. Jetzt wollen sie die krakenähnlichen Zellen für den Kampf gegen Krebs rüsten.

Von Jacques Banchereau

Sie lieben es versteckt. In allen Körpergeweben, die Kontakt mit der Umwelt haben, liegen sie auf der Lauer. Ihre langen tentakelähnlichen Arme halten sie weit von sich gestreckt – ständig auf der Suche nach Krankheitserregern und deren Giftstoffen.

Sie sind es, die in den Schleimhäuten von Nase und Lunge mit als Erste ein Grippe-Virus registrieren, das wir in einer überfüllten U-Bahn eingeatmet haben. Sie sind es auch, die im Verdauungstrakt das Immunsystem alarmieren, wenn wir mit verseuchter Nahrung eine gefährliche Dosis »giftiger« Salmonellen verschluckt haben. Und von ganz besonderer Bedeutung ist ihre Präsenz in der Haut, wo sie als verborgene Wächter in ständiger Alarmbereitschaft stehen – für den Fall, dass Mikroben den äußeren Schutzwall unserer Oberhaut durchbrechen. Die Rede ist von den dendritischen Zellen, einer Untergruppe der weißen Blutkörperchen. Sie gehören zu den am wenigsten verstandenen, gleichzeitig aber auch faszinierendsten Akteuren des Immunsystems. Erst in den letzten Jahren konnten Forscher einen Einblick in jene geheimnisvollen Vorgänge gewinnen, mit denen diese Zellen ihre Kollegen in der Abwehr darüber aufklären, was zum Körper gehört und was fremd und damit potenziell gefährlich ist.

Dabei stellten sie Verblüffendes fest: Die merkwürdigen Zellen bringen die Immunantwort überhaupt erst in Gang und regeln gleichzeitig ganz entscheidend deren Art und Verlauf. So erwiesen sie sich als unverzichtbar für die Ausbildung eines immunologischen »Gedächtnisses«, das Eindringlinge nach der ersten Bekanntschaft rasch wieder erkennt und bekämpft – die Grundlage für den Erfolg jeder Schutzimpfung. Dendritische Zellen erziehen aber auch das Immunsystem dazu, körpereigene Strukturen zu tolerieren und nicht zu attackieren. ▷

Krebs

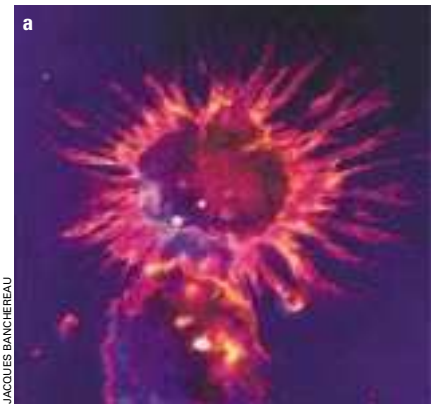
Mit langen, tentakelartigen Armen fischen die dendritischen Zellen des Immunsystems nach Krankheitserregern in ihrer Umgebung.

JEFF JOHNSON

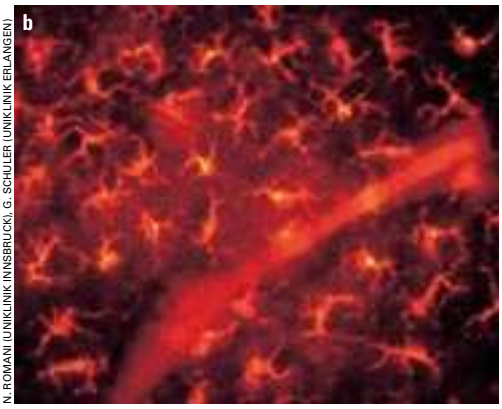
Doch haben die Zellen auch ihre Schattenseiten. Werden sie zum falschen Zeitpunkt aktiviert, können sie Autoimmun-Krankheiten auslösen wie *Lupus erythematodes*, eine Erkrankung, bei der das Immunsystem die Erbsubstanz der Betroffenen angreift.

Im Falle der erworbenen Immunschwäche Aids werden dendritische Zellen zum trojanischen Pferd. Quasi per Anhalter reist das HI-Virus in ihrem Inneren zu den Lymphknoten, wo es auf Unmengen seiner eigentlichen Opfer trifft, auf so genannte T-Helferzellen. Es befällt sie, vermehrt sich in ihrem Inneren, vernichtet die Zellen aber auch. Das Fortschreiten der Krankheit wird so auf fatale Weite beschleunigt. Denn erst durch den massiven Verlust der T-Helferzellen kommt es zum Ausbruch von Aids.

Wissenschaftler wollen die wichtige Rolle, die dendritische Zellen bei der Immunantwort spielen, nutzen und die Zellen für den Kampf gegen Krebs und andere Krankheiten rüsten. Aber auch ihre gezielte Inaktivierung kann medizinisch von großem Nutzen sein.



JACQUES BANCHEREAU



N. ROMANI (UNIKLINIK INNSBRUCK), G. SCHULER (UNIKLINIK ERLANGEN)

Reife dendritische Zellen, gleich ob von Mensch (a), Maus (c) oder Ratte (d), zeichnen sich durch ihre langen, dünnen Arme aus. Im unreifen Stadium, hier in der menschlichen Oberhaut (b), sind die Arme charakteristisch verästelt. Die dendritische Zelle der Ratte (d) interagiert wahrscheinlich gerade mit einer T-Helferzelle. Dadurch lehrt sie diese, wer Freund und wer Feind ist. Zellen wie die in Bild a werden als Impfstoff gegen Krebs eingesetzt.

Potente Stimulatoren

Prinzipiell machen sich dendritische Zellen ziemlich rar: Sie stellen gerade einmal 0,2 Prozent aller weißen Blutkörperchen in der Blutbahn und noch weniger in Geweben wie der Haut. Das ist wohl einer der Gründe dafür, dass den Wissenschaftlern zunächst rund hundert Jahre lang die wahre Funktion dieser Zellen verborgen blieb.

Der deutsche Anatom Paul Langerhans hatte bereits 1868 diesen Zelltypus erstmals beschrieben, ihn aber fälschlicherweise nicht für etwas Eigenständiges gehalten, sondern für Nervenendigungen in der Haut. Erst 1973 entdeckte Ralph M. Steinman von der New Yorker Rockefeller-Universität solche Zellen in der Milz von Mäusen und erkannte, dass sie Teil des Immunsystems sind. In Tierversuchen erwiesen sie sich als außerordentlich potente Stimulatoren der Immunabwehr. Auf Grund ihrer spitzen, astförmigen Arme nannte Steinman sie dendritische Zellen, nach »dendros», griechisch für Baum. Jene Untergruppe, die in der Oberhaut vorkommt, heißt aber noch heute – nach ihrem ursprünglichen Entdecker – Langerhans-Zellen.

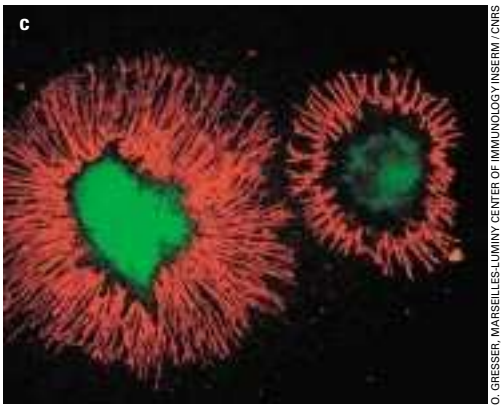
Doch selbst nach der Wiederentdeckung der dendritischen Zellen vergingen noch einmal fast zwanzig Jahre an Detailarbeit, bis es endlich möglich war, sie zur eingehenderen Untersuchung in größeren Mengen zu züchten, statt sie mühsam aus frischem Gewebe zu isolieren. 1992 – ich arbeitete damals am Schering-Plough-Laborartorium für Immunologische Forschung in Dardilly (Frankreich) – gelang es meinem Team erstmals, große Mengen dendritischer Zellen aus menschlichen Knochenmarksstammzellen heranzuzüchten. Etwa um die gleiche Zeit berichtete auch Steinman über einen ähnlichen Erfolg: Gemeinsam mit dem Team von Kayo Inaba an der Universität Kioto in Japan hatte er ein Verfahren entwickelt, dendritische Zellen von Mäusen zu kultivieren.

Einen weiteren Weg fanden 1994 schließlich Wissenschaftler um Antonio Lanzavecchia, der mittlerweile am Institut für biomedizinische Forschung im schweizerischen Bellinzona arbeitet, und Gerold Schuler, heute an der Universität Erlangen-Nürnberg. Sie züchteten die begehrten Zellen aus menschlichem Blut. Bestimmte weiße Blutkörperchen – die Monocyten – entpuppten sich als ein gemeinsamer Vorläufer von dendritischen Zellen und großen Fresszellen, die im Körper abgestorbenes Material und Mikroben beseitigen. Inzwischen können wir sogar weniger spezialisierte Vorläuferarten dazu bringen, sich in diese Zellen zu differenzieren. Seither haben sich unsere Kenntnisse über die Funktionsweise dendritischer Zellen enorm erweitert.

Es gibt mehrere Untergruppen solcher Zellen. Sie alle entwickeln sich aus den gleichen Vorläufern, die zunächst im Blut zirkulieren, um sich dann in noch unreifer Form in Haut, Schleimhäuten und Organen wie Lunge und Milz einzunisten. In unreifem Zustand verfügen dendritische Zellen über ganz verschiedene Mechanismen, um Mikroorganismen oder deren Moleküle dingfest zu machen. Sie können

IN KÜRZE

- **Dendritische Zellen** kommen in vielen Geweben vor, hauptsächlich aber in Haut und Schleimhäuten. Dort fangen sie Eindringlinge wie Bakterien und Viren ab und zerlegen diese. Die Bruchstücke präsentieren sie außen als Antigene, die das Immunsystem erkennen kann.
- Mit Antigenen beladen wandern die dendritischen Zellen zu Lymphknoten oder Milz, wo sie mit anderen Zellen des Immunsystems interagieren. Zu diesen gehören unter anderem **B-Zellen**, die für die Antikörperproduktion zuständig sind, oder **T-Killerzellen**, die Mikroben und infizierte Körperzellen direkt attackieren und vernichten.
- Speziell behandelte dendritische Zellen werden bereits in klinischen Versuchen als **Impfstoffe gegen Krebs** erprobt. Andere Forscher haben es sich zum Ziel gemacht, Fehlaktivitäten dieser Zellen zu stoppen, um so gegen Autoimmunkrankheiten wie *Lupus erythematodes* anzugehen.



O. GRESSER, MARSEILLES-LUMINY CENTER OF IMMUNOLOGY INSERM / CNRS

W. E. BOWERS, S. HALEY UND R. HUNT, UNIVERSITY OF SOUTH CAROLINA

- die Invasoren mit saugnapfartigen Rezeptoren auf ihrer Oberfläche einfangen und vereinnahmen,
- winzige Schlückchen der umgebenden Flüssigkeiten samt gelösten Proteinen aufsaugen,
- Viren oder Bakterien über mikroskopisch kleine, sich einstülpende Membransäckchen aufnehmen.

Manche unreife dendritische Zellen können zudem Viren außer Gefecht setzen, indem sie den Botenstoff alpha-Interferon ausschütten, wie Yong-Jun Liu feststellte, einer meiner früheren Kollegen bei dem Unternehmen Schering-Plough und heute am DNAX Research Institute im kalifornischen Palo Alto tätig. Die Substanz hat vielfältige Wirkungen. Unter anderem wird letztlich die Bildung von Virusproteinen unterdrückt, ohne die keine neue Virusgeneration entstehen kann.

Antigene auf dem Präsentierteller

Haben unreife dendritische Zellen fremde Objekte erst einmal verschlungen, zerlegen sie diese in handliche molekulare Bruchstücke, die von anderen Abwehrzellen erkannt werden können (siehe die Illustration auf den beiden nächsten Seiten). Solche molekularen Strukturen – Antigene genannt – bieten sie dann auf einer Art Präsentierteller auf ihrer Oberfläche zur Begutachtung an. Zur Präsentation dienen Proteine, die als MHC-Moleküle bezeichnet werden. Benannt sind sie nach dem Haupt-Histokompatibilitätskomplex (englisch: *major histocompatibility complex*), der Gengruppe, in der ihre Bauanleitung verschlüsselt ist. Die Proteine haben eine ganz charakteristische Form: Wie eine Zange mit breiten Backen halten sie die zur Präsentation aufbereiteten Antigene fest.

Dendritische Zellen sind äußerst effektive Fänger und Präsentierer. Selbst fremde Moleküle, die nur in winzigsten Konzentrationen auftreten, entgehen ihnen nicht. Noch während sie das eingefangene Material zur Präsentation aufbereiten, wandern die Zellen bereits über die Blutbahn in die Milz oder über die Lymphbahn zu den Lymphknoten. Dort schließen sie ihren Reifeprozess ab und präsentieren ihre beladenen MHC-Moleküle anderen Zellen des Immunsystems: etwa naiven T-Helferzellen, so genannt, weil sie noch nie mit richtigen Antigenen zu tun hatten. Mehr noch: Die dendritischen Zellen sorgen dafür, dass die Helferzellen ein Antigen als »fremd« oder »gefährlich« einordnen können.

Diese einzigartige Fähigkeit, naive T-Helferzellen zu lehren, was sie zu tun und zu lassen haben, verdanken dendritische Zellen offenbar weiteren, so genannten kostimulatorischen Molekülen auf ihrer Oberfläche. Mit diesen docken sie an passende Rezeptoren einer T-Zelle an, während sie ihr gleichzeitig das Antigen auf dem MHC-Teller servieren. Ist eine T-Helferzelle erst einmal »sensibilisiert», kann sie ihre »hilfreiche« Funktion ausüben: zum Beispiel so genannte B-Abwehrzellen dazu veranlassen, Antikörper zu produzieren. Diese Moleküle heften sich wiederum an das entsprechende Antigen in natura und machen es entweder unschädlich oder markieren es als zu zerstörendes Ziel. Sowohl dendritische Zellen als auch T-Helferzellen aktivieren außerdem T-Killerzellen. Deren Aufgabe ist es, von Erregern befallene Körperzellen zu zerstören. Einige der gut erzogenen T-Helferzellen entwickeln sich zu »Gedächtniszellen«, die für Jahre, vielleicht sogar Jahrzehnte im Organismus überdauern. Treffen sie später erneut auf das Antigen, gegen das sie sensibilisiert sind, werden sie sehr schnell aktiv – viel schneller als naive T-Helferzellen. Deshalb kann das Immunsystem bei einem erneuten Angriff des gleichen Erregers meist rascher zurückschlagen als beim ersten Mal.

Ob sich der Körper bei einer Infektion schließlich bevorzugt mit Hilfe von Antikörpern oder mit T-Killerzellen wehrt, hängt offenbar zumindest teilweise davon ab, welche Gruppe von dendritischen Zellen die Botschaft überbracht hat. Die Helferzellen produzieren immunstimulierende Substanzen aus der Klasse der Cytokine, und zwar je nach »Ansprache« vom Typ 1 oder 2. Bei einem Befall mit Parasiten und manchen Bakterien ist Typ 2 am besten, sorgt er doch dafür, dass sich das Immunsystem mit Antikörpern wehrt. Typ-1-Cytokine rufen hingegen T-Killerzellen auf den Plan, die mit Körperzellen aufräumen können, in denen sich Viren oder gewisse Bakterien eingenistet haben.

Der richtige Cocktail sorgt für eine angemessene Immunantwort und kann sogar über Leben und Tod entscheiden. Startet eine dendritische Zelle an dieser Schlüsselstelle das falsche Programm, indem sie die Abgabe des falschen Cytokin-Typs anregt, bekommt die beginnende Offensive des Immunsystems unter Umständen eine falsche Stoßrichtung. Ein Beispiel: Menschen, die sich mit dem Lepra-Bakterium infizieren und eine Immunantwort vom Typ 1 starten, entwickeln eine Nervenlepra – eine milde, »tuberkuloide« Verlaufsform der Erkrankung. Eine Immunantwort vom Typ 2 führt hingegen eher zur gefährlichen »lepromatösen« Form, auch Knotenlepra genannt, die tödlich enden kann.

Die richtige Aktivierung von naiven T-Helferzellen ist auch die Grundlage für erfolgreiche Impfungen – sei es gegen Lungenentzündung, Tetanus oder Grippe. Forscher versuchen nun, ihre neu gewonnenen Kenntnisse über die Aufgaben dendritischer Zellen auch in eine Strategie gegen Krebs umzusetzen.

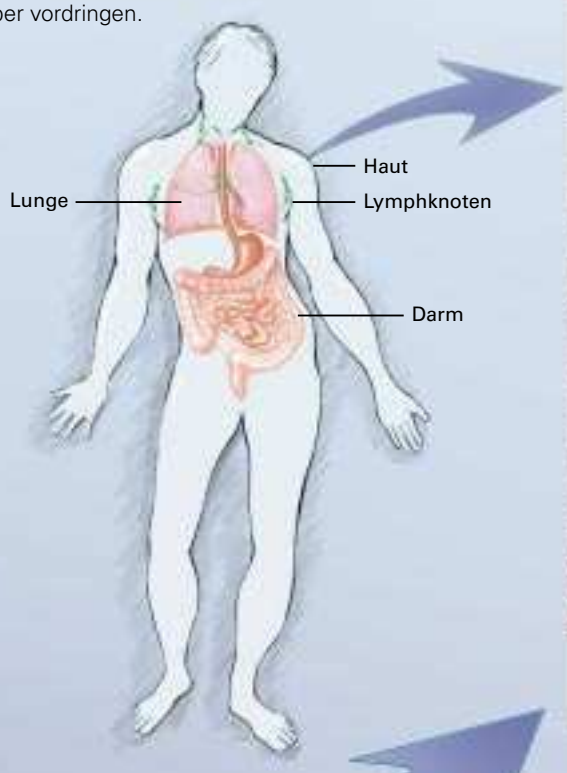
Tumormoleküle als immungerechte Häppchen

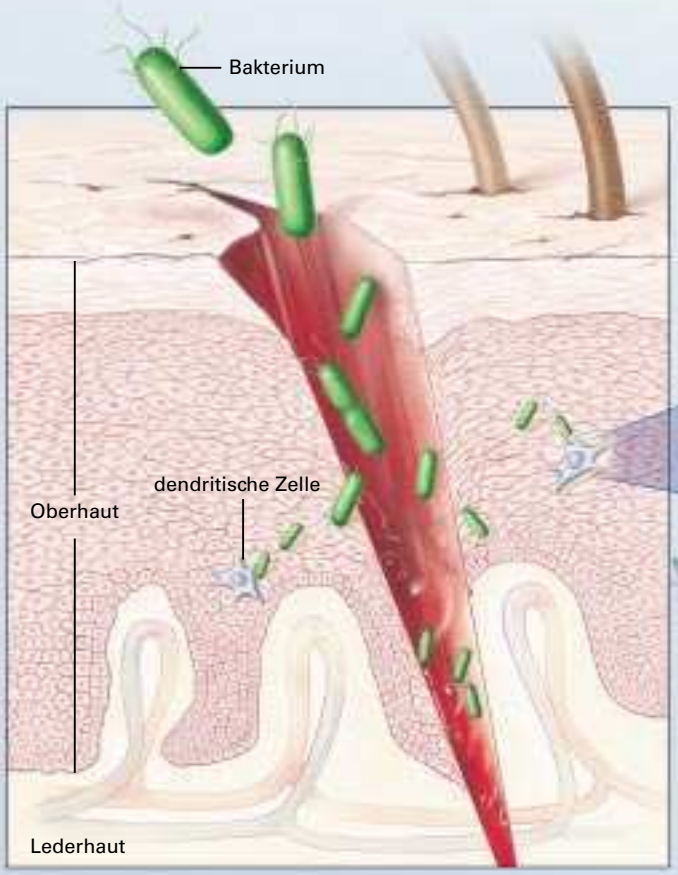
Die Theorie dahinter lautet: Weil sie so abnorm sind, tragen Krebszellen Moleküle auf ihrer Oberfläche, die auf gesunden Körperzellen nicht vorkommen. Und genau hier könnte der Schlüssel für eine gezieltere Bekämpfung von Krebs liegen – vorausgesetzt, es gelingt, Medikamente oder Impfstoffe zu entwickeln, die sich ausschließlich gegen diese verräterischen Moleküle richten. Normale Zellen würden verschont. Und damit blieben auch einige der gefürchteten Nebenwirkungen heutiger Chemo- und Strahlentherapie aus, wie Haarverlust, Übelkeit und Schwächung des Immunsystems.

Geeignete, für Krebszellen spezifische Antigene zu finden erwies sich als schwie- ▷

Die Rolle von dendritischen Zellen bei Infektionen

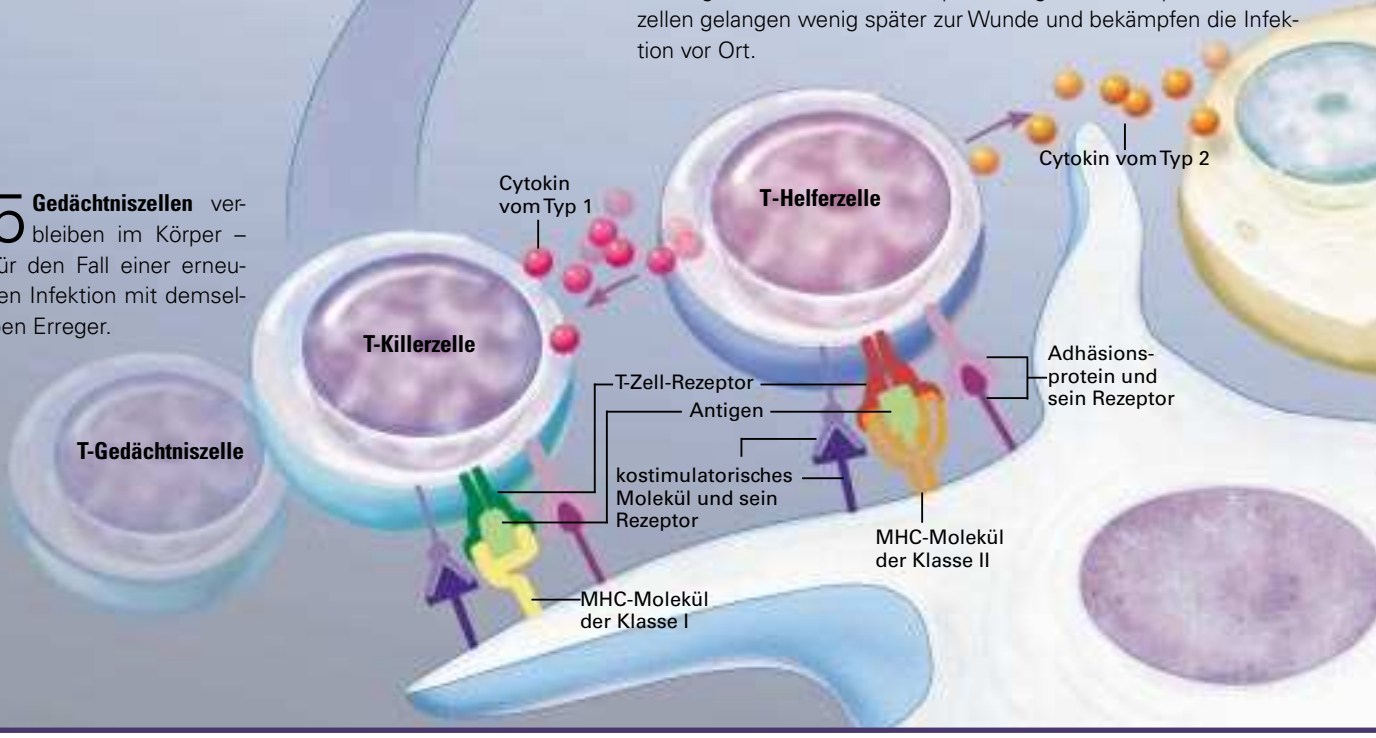
1 **In Haut, Darm, Lunge und Lymphknoten** spielen dendritische Zellen eine entscheidende Rolle bei der Immunabwehr von Krankheitserregern. Dargestellt ist die Bekämpfung von Bakterien, die durch einen Hautschnitt in den Körper vordringen.

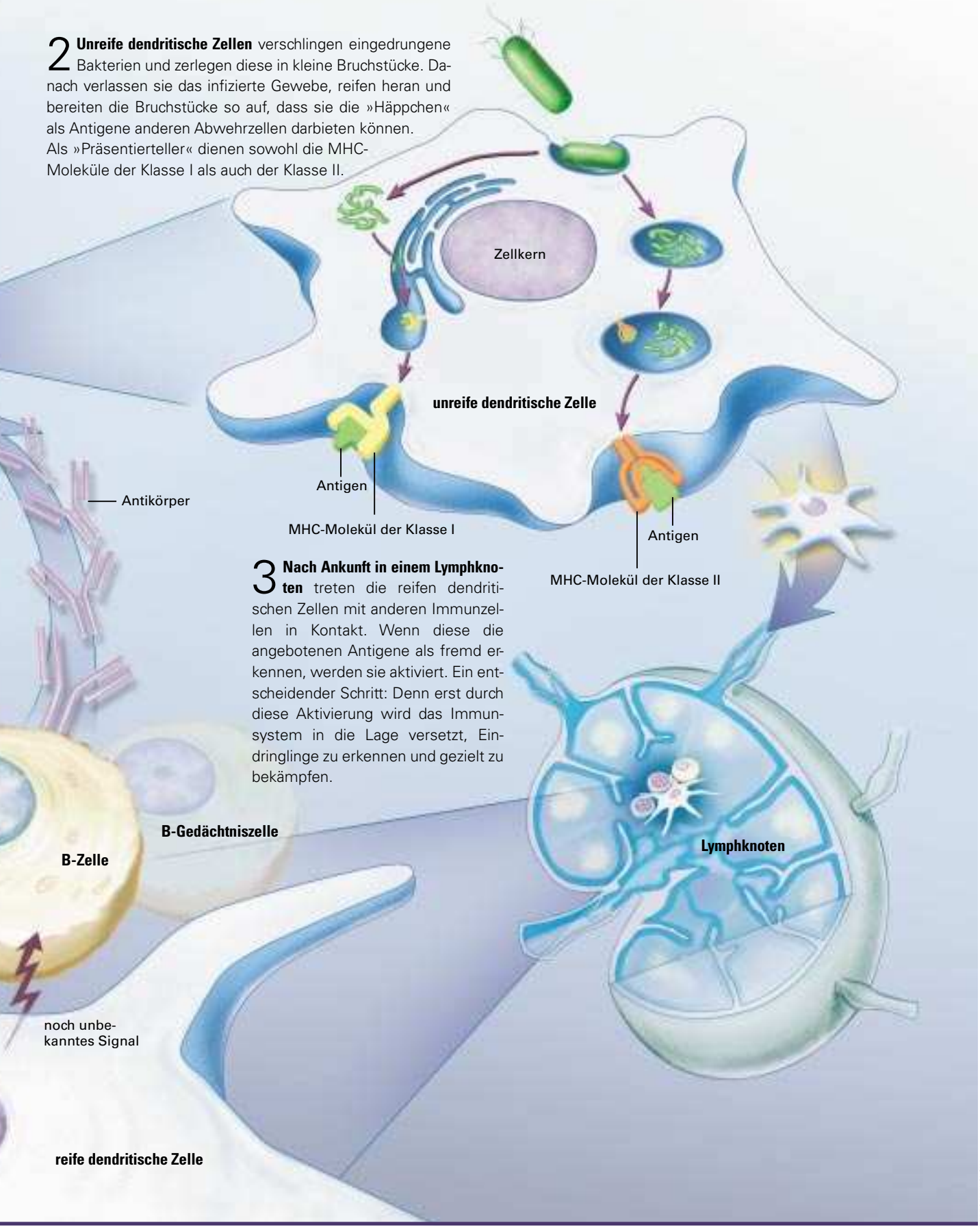




4 **Dendritische Zellen haften** über eine raffinierte molekulare Kupplung an T-Helferzellen, T-Killerzellen und möglicherweise auch an B-Zellen. Dadurch beginnen die Helferzellen, Botenstoffe wie Cytokine zu bilden. Diese stimulieren wiederum die Killerzellen und regen B-Zellen zur Antikörperbildung an. Antikörper und Killerzellen gelangen wenig später zur Wunde und bekämpfen die Infektion vor Ort.

5 **Gedächtniszellen** verbleiben im Körper – für den Fall einer erneuten Infektion mit demselben Erreger.



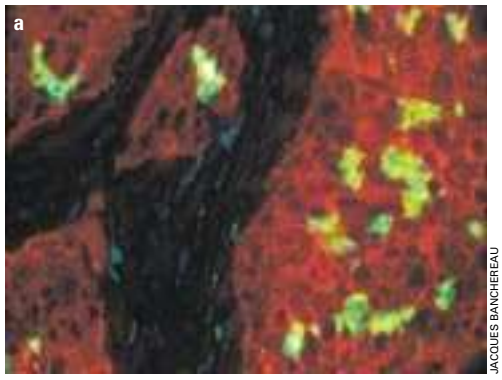


TERESE WINSLOW

rig. Doch bei einigen Krebsarten, etwa dem Schwarzen Hautkrebs (Melanom), ist das mittlerweile gelungen. Zu Beginn der 1990er Jahre identifizierten Arbeitsgruppen um Thierry Boon vom Ludwig-Institut für Krebsforschung in Brüssel und Steven A. Rosenberg vom Nationalen Krebsforschungszentrum in Bethesda, Maryland, unabhängig voneinander solche spezifischen Antigene des Melanoms. Therapien, die darauf abzielen, werden derzeit an freiwilligen Patienten getestet.

Dabei kommen in der Regel Vorläufer von dendritischen Zellen zum Einsatz, die aus dem jeweiligen Patienten isoliert und zunächst zusammen mit Tumor-Antigenen kultiviert wurden. Die entstandenen dendritischen Zellen nehmen das Material auf und präsentieren es »immungerecht«. Geht alles glatt, machen die mit Antigenen voll beladenen Zellen das Immunsystem des Patienten gegen den eigenen Tumor mobil.

Etliche Arbeitsgruppen sowie mehrere Biotechnikfirmen (siehe Kasten unten) erproben diese Strategie derzeit gegen weitere Krebsformen, darunter B-Zell-Lymphom, Prostata- und Dickdarmkarzinom. Das Melanom bleibt aber weiterhin ein Schwerpunkt. Im September 2001 berichteten beispielsweise zwei kooperierende Teams – meines und das von Steinman – über einen Erfolg versprechenden Ansatz: 16 von 18 Patienten mit fortgeschrittenem Melanom, die mit entsprechend aufbereiteten dendritischen Zellen behandelt worden waren, zeigten erste, im Test erfassbare Anzeichen einer verstärkten Immunantwort gegenüber ihrem Krebs. Wichtiger noch: Neun Patienten entwickelten eine Immunantwort gegen mehr als zwei der verwendeten Antigene – mit dem Effekt, dass sich auch das Tumorwachstum verlangsamt hatte.



JACQUES BANCHEREAU

Färbetechniken machen dendritische Zellen kenntlich. Hier: grün im Brustkrebsgewebe (a) oder rot in normaler Haut (b). Reife dendritische Zellen produzieren Proteine, die es ihnen erlauben, an andere Zellen anzudocken (c). Sie stellen außerdem zangenähnliche Rezeptoren her, mit Fragmenten von Eindringlingen bestückt, die sie anderen Immunzellen zeigen (grüne Punkte, d).

Derzeit arbeiten verschiedene Wissenschaftler daran, den Therapieansatz methodisch weiter zu verfeinern und ihn an einer größeren Zahl von Patienten zu erproben. Bislang wurden solche potenziellen Impfstoffe, die auf dendritischen Zellen basieren, nur an Patienten in fortgeschrittenen Erkrankungsstadien getestet. Vermutlich sprechen aber Betroffene in frühen Stadien besser auf die Therapie an. Denn ihr Immunsystem steht noch nicht mit dem Rücken zur Wand.

Weiße Flecken und hohe Kosten

Allerdings gibt es verschiedene Bedenken: So könnten entsprechend scharf gemachte dendritische Zellen das Immunsystem auch veranlassen, irrtümlicherweise gegen gesundes Körpergewebe vorzugehen. Bei einigen der Melanom-Patienten, die als Erste überhaupt derartige Impfstoffe erhielten, traten weiße Flecken auf der Haut auf – ein Warnzeichen dafür, dass auch normale pigmentbildende Zellen, die Melanocyten, zerstört werden.

Wir müssen außerdem einkalkulieren, dass Tumorzellen sich durch Mutationen dem Immunsystem wieder entziehen – wenn sie infolge einer Genveränderung nicht mehr jene Antigene erzeugen, gegen die sich die Attacke richtet. Die fortwährende Veränderung von Tumorzellen ist freilich ein generelles Problem, das auch herkömmliche Krebstherapien oft scheitern lässt.

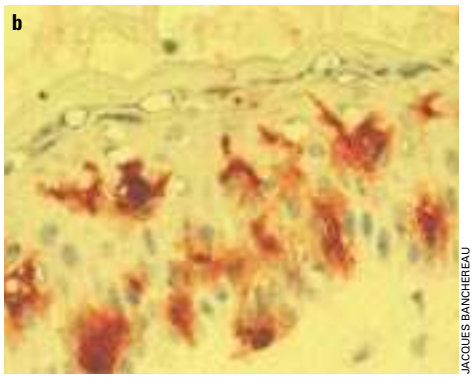
Schließlich stellt sich aber noch die Kostenfrage. Denn die dendritischen Zellen müssen für jeden Patienten individuell hergestellt werden. Die vielen Einzelschritte beim Verfahren – von der Isolation der Zellen aus jedem Patienten über ihre Manipulation im Labor bis zur späteren Reinjektion – machen die Methode sehr zeitaufwendig und dementsprechend teuer. Doch auch hier tüfteln bereits einige Forscherteams an neuen Ansätzen.

Eine Idee: die Vorläufer der dendritischen Zellen gleich vor Ort – im Körper eines Patienten – zur Teilung anzuregen und über ihre Abkömmlinge das körpereigene

Krebsimpfstoffe auf dem Prüfstand

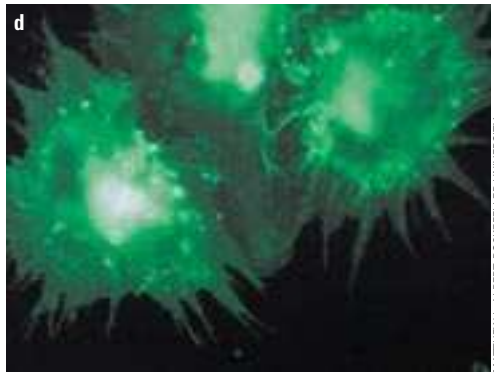
Die Tabelle listet eine kleine Auswahl von Impfstoffen gegen Krebs auf, die direkt oder indirekt auf der Basis von dendritischen Zellen wirken. Die Unbedenklichkeit der potenziellen Impfstoffe wird in klinischen Studien der Phase I überprüft, ihre Wirksamkeit in Phase II und III. Sind diese erfolgreich verlaufen, kann der Hersteller die Zulassung für die Therapie beantragen.

Name der Firma	Firmensitz	Art der Krebserkrankung	Status
ML Laboratories	Warrington, England	Melanom	Phase I steht bevor
Dendreon	Seattle, USA	Prostata, Brust, Eierstock, Darm, Gebärmutterkörper	Phase I (Brust, Eierstock, Darm, Gebärmutterkörper), Phase I (Brust), Phase III (Prostata)
Genzyme	Framingham, USA	Niere, Brust, Melanom	Phase I
Immuno-Designed Molecules	Paris, Frankreich	Prostata, Melanom	Phase II
Merix Bioscience	Durham, USA	Melanom	Phase I steht bevor
Oxford BioMedica	Oxford, England	Dick- und Enddarm	Phase I/II
Zycos	Lexington, USA	verschiedene Krebsarten (Impfstoffe auf DNA-Basis)	Phase I und II



JACQUES BANCHEREAU

JACQUES BANCHEREAU



MATTHEW L. ALBERT, ROCKEFELLER UNIVERSITY

Abwehrsystem gegen den Tumor mobilzumachen. Ein dafür geeignetes Cytokin entdeckte die Arbeitsgruppe um David H. Lynch von der Firma Immunex in Seattle (sie wurde vor kurzem von der Firma Amgen in Thousand Oaks, Kalifornien, übernommen). Bei Mäusen kurbelt der Botenstoff die Bildung von dendritischen Zellen an – mit der Folge, dass Tiere eines immunschwachen Stammes transplantiertes Tumorgewebe schließlich doch abstoßen.

Sogar Tumorzellen selbst besitzen ein großes Potenzial als »Krebs-Impfstoff«, wie unter anderem Drew M. Pardoll von der Johns-Hopkins-Universität in Baltimore, Maryland, festgestellt hat. Auf gentechnischem Wege werden die Krebszellen dazu gebracht, große Mengen an Cytokinen zu erzeugen und abzugeben, die wiederum dendritische Zellen aktivieren.

Auch das gezielte Abschalten von dendritischen Zellen verspricht therapeutischen Nutzen, und zwar immer dann, wenn ihre Tätigkeit eine Krankheit eher verschlimmert als lindert. Dies ist bei Autoimmun-Erkrankungen der Fall: Hier versagt die »Eigentoleranz« und das Abwehrsystem richtet sich gegen körpereigene Strukturen.

Die erste, zentrale Instanz, die für Toleranz sorgt, ist der Thymus. In diesem Organ hinter dem Brustbein reifen die T-Zellen aus. Dort werden sie einer strengen Prüfung unterzogen

Wenn unreife T-Zellen zu stark auf körpereigene Moleküle reagieren, werden sie eliminiert, bevor sie eine Chance haben, im Körper zu zirkulieren und Unheil anzurichten. Doch ist es unvermeidbar, dass einige Zellen dieser Auslese entgehen. Der Organismus verfügt daher über ein Backup-System, das als periphere Instanz für Immuntoleranz sorgt.

Eben diese periphere Immuntoleranz scheint bei Menschen gestört zu sein, die an Autoimmun-Krankheiten wie Rheumatoider Arthritis, Typ-1-Diabetes oder systemischem *Lupus erythematodes* leiden. Vergangenes Jahr wies ich mit meinen Kollegen nach, dass dendritische Zellen aus dem Blut von Patienten mit *Lupus* überaktiv sind. Sie setzen enorme Mengen an alpha-Interferon frei. Dieser immunstimulierende Botenstoff veranlasst Vorläuferzellen, bereits zu dendritischen Zellen auszureifen, noch während sie sich in der Blutbahn aufhalten.

Solche »frühreifen« dendritischen Zellen nehmen freie DNA auf, die ebenfalls in ungewöhnlich großen Mengen im Blut der Patienten vorkommt. Ergebnis: Das Immunsystem beginnt mit der Produktion von Antikörpern gegen die körpereigene DNA. Die Antikörper verklumpen mit der DNA zu Aggregaten, die Gefäß- und Nierenschäden verursachen. Wir glauben deshalb, dass ein Wirkstoff, der alpha-Interferon blockiert, an einer frühen Schaltstelle ansetzen und gegen *Lupus* helfen könnte. Denn so ließe sich möglicherweise die fatale frühzeitige Aktivierung der dendritischen Zellen im Blut verhindern. Eine ähnliche Strategie könnte in der Transplantationsmedizin dazu dienen, Empfänger von Spenderorganen vor einer immunologischen Abstoßungsreaktion zu schützen.

Missbrauch durch Mikroben

Selbst Aids-Patienten werden vielleicht einmal vom besseren Verständnis dendritischer Zellen profitieren. Im Jahr 2000 fanden Carl G. Figdor und Yvette van Kooyk von der Universitätsklinik St. Radboud im niederländischen Nijmegen heraus, dass bestimmte dendritische Zellen ein Molekül namens DC-SIGN herstellen. An diesem kann das HI-Virus andocken, wenn die Zellen ihm während ihrer regelmäßigen Patrouillengänge durch Schleimhäute oder tiefer liegende Gewebe begegnen. Wandern sie dann wenig später in einen Lymphknoten, bringen sie das Virus unabsichtlich mit großen Mengen an T-Zellen in Kontakt. Wirkstoffe, welche die Interaktion von DC-SIGN und HIV verhindern, könnten daher das Fortschreiten von Aids verlangsamen.

Auch andere Viren, darunter Masern- und Cytomegalie-Viren, oder Blutparasiten wie der Malariaerreger manipulieren dendritische Zellen für ihre eigenen Zwecke. Wenn etwa rote Blutkörperchen vom Malariaerreger befallen sind, binden sie sich an dendritische Zellen und verhindern so, dass diese ausreifen und das Immunsystem alarmieren. Mehrere Forschergruppen entwickeln derzeit Strategien, um Mikroben am Missbrauch dendritischer Zellen zu hindern. Einige versuchen sogar den Spieß umzudrehen und dendritische Zellen, die besonders stark mit Antigenen beladen sind, zur Bekämpfung der Krankheitserreger einzusetzen.

Eine zunehmende Zahl an Forschern und Firmen, die sich auf diesem Gebiet tummeln, gibt jedenfalls Anlass zur Hoffnung, dass wir mit diesen faszinierenden Zellen bald Krankheiten behandeln oder vorbeugen können, gegen die wir heute noch weitgehend machtlos sind. ◁

Jacques Banchereau ist promovierter Biochemiker und seit 1996 Direktor des Bayler Institute for Immunology Research in Dallas (Texas). Forschungsschwerpunkt des Instituts ist die Suche nach neuen Therapien gegen Krebs und Infektions-, aber auch Autoimmunkrankheiten durch einen gezielten Eingriff in das Immunsystem.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Dendritische Zellen – Spezialisten der Antigenpräsentation. Von Nikolaus Romani, Eckhard Kämpgen und Gerold Schuler in: Aspekte im Gespräch, Nr. 5, S. 26, 1996.

Dendritic Cells as Vectors for Therapy. Von Jaques Bancherau et al. in: Cell, Bd. 106, S. 271, 2001.

Dendritic Cells and the Control of Immunity. Von Jaques Banchereau und Ralph M. Steinman in: Nature, Bd. 392, S. 245, 1998.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

ASTRONOMIE

Marseis nass statt trocken

Seit den 1960er Jahren glaubte man, dass das Eis an den Polen unseres Nachbarplaneten nicht aus Wasser, sondern aus gefrorenem Kohlendioxid (»Trockeneis«) besteht. Anders schienen die hohen Kohlendioxidkonzentrationen in der Atmosphäre nicht erklärbar. Die Nasa-Sonde »Global Surveyor« entlarvte dies nun jedoch als Fehlschluss. Auf ihren Detailaufnahmen von der Marsoberfläche sind merkwürdige, fast kreisförmige Löcher in der Eiskappe des Südpols zu erkennen. Sie haben glatte Böden und sind trotz stark schwankender Durchmesser von einigen hundert bis mehreren tausend Metern nie tiefer als acht Meter – das beweist der Schattenwurf ihrer senkrechten Wände. Ein weiterer Nasa-Satellit (Mars Odyssey) stellte zudem fest, dass es am Grund dieser Gruben im Sommer viel zu warm für Trockeneis ist. Daher vermuten Shane Byrne und Andrew P. Ingersoll vom

NASA / JPL / MSSS

Kreisförmige Löcher lassen die Eiskappe des Marspols wie einen Schweizer Käse aussehen.

California Institute of Technology in Pasadena, dass die Kohlendioxiddecke nur acht Meter dick ist. In sie schmilzt die Sonne im Sommer Löcher und entblößt dabei die darunter liegende mächtige Schicht aus Wassereis. *(Science, 14. 2. 2003, S. 1048)*

WAHRNEHMUNG

Der siebte Sinn der Haie

Als Räuber der Meere verfügen Haie über äußerst scharfe Sinne. So können sie sogar elektrische Felder wahrnehmen. Die Sensoren für diesen sechsten Sinn befinden sich in den Lorenzinischen Ampullen am Kopf – kleinen Vesikeln, an denen Nervenfasern enden und von denen mit Gallerte gefüllte Kanäle zu Poren in der Haut verlaufen (Bild). Brandon Brown von der Universität von San Francisco entdeckte nun, dass das Gel in diesen Kanälen zugleich als hochempfindlicher Temperaturfühler dient. Es hat halbleiterähnliche Eigenschaften. Damit eignet es sich zum Aufbau starker Thermokräfte, wie sie aus der Festkörperphysik bekannt sind. Unter dem Einfluss von Temperaturgradienten entstehen elektrische Spannungen, welche die Neuronen an den Ampullenwänden zum Feuern anregen. Schon Temperaturunterschiede von nur einem zehntel Grad innerhalb des Kanals können die Signalstärke in den angrenzenden Nervenbahnen um bis zu 300 Prozent steigern. Haie registrieren Wärmeschwankungen damit weitaus empfindlicher als Säugetiere, bei denen lo-

CORBIS

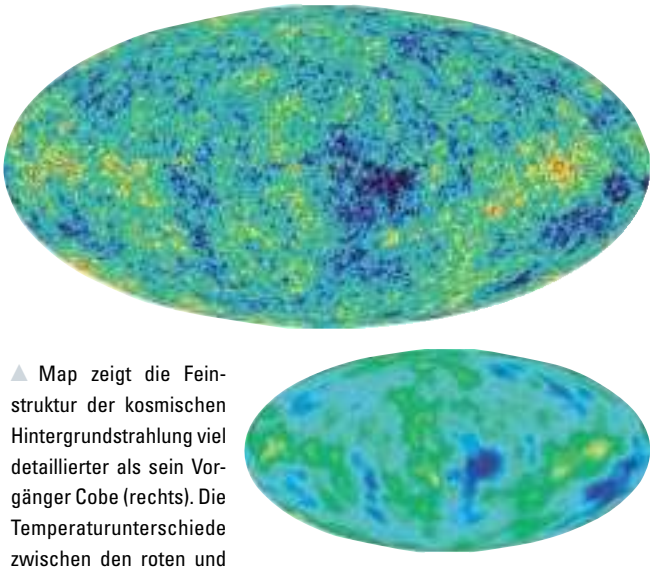
Die dunklen Poren an der Haischnauze sind die Eingänge für den Elektro- und Temperatursinn.

nenkanäle Temperaturdifferenzen in elektrische Signale umwandeln. Dieser siebte Sinn hilft ihnen vermutlich, beutereiche Fronten zwischen Wassermassen unterschiedlicher Temperatur ausfindig zu machen. *(Nature, 30. 1. 2003, S. 495)*

ASTROPHYSIK

Abbild der Urzeit des Alls

Zwölf Monate lang vermaß der Nasa-Satellit Map die kosmische Hintergrundstrahlung: das auf 2,73 Grad über dem absoluten Temperatur-Nullpunkt (–273,15°C) abgekühlte Nachglühen jenes Feuerballs, der das Universum 380 000 Jahre nach seiner Geburt erfüllte. Heraus kam das bislang genaueste Bild von den Anfängen unserer Welt. Mit hoher Auflösung zeigt es die winzigen Temperaturschwankungen, aus denen die ersten Strukturen des jungen Kosmos hervorgingen. Der Satellit Cobe hatte Anfang der 1990er Jahre noch ein viel gröberes Muster geliefert. Die Analyse der neuen Daten ergab genaue Antworten auf grundlegende kosmologische Fragen. Danach ist das Weltall exakt 13,7 Milliarden Jahre alt. Die ersten Sterne begannen nach 200 Millionen Jahren zu strahlen – viel früher als bisher angenommen. Zudem bestehen nur vier Prozent des Universums aus normaler Materie. 23 Prozent sind Dunkle Materie und 73 Prozent gehen auf das Konto einer noch geheimnisvolleren »dunklen Energie«. *(Goddard Space Flight Center, 11. 2. 2003)*



GODDARD SPACE FLIGHT CENTER

Map zeigt die Feinstruktur der kosmischen Hintergrundstrahlung viel detaillierter als sein Vorgänger Cobe (rechts). Die Temperaturunterschiede zwischen den roten und blauen Flecken betragen nur 0,0004 Grad Celsius.

COMPUTERTECHNIK

Lauschangriff mit dem Neuro-Chip

Nervenzellen bei der Arbeit beobachten, ohne sie zu verletzen oder auch nur zu stören – diesen Traum vieler Neurologen soll nun ein neuartiger Chip erfüllen. Er wurde in der Forschungsabteilung der Münchner Firma Infineon in Zusammenarbeit mit dem Max-Planck-Institut für Biochemie in Martinsried entwickelt. Auf nicht mehr als einem Quadratmillimeter birgt er 128 Reihen mit je 128 Sensoren. Diese 16 384 Messpunkte verstärken über hochempfindliche Schaltungen die extrem schwachen elektrischen Signale von Nervenzellen und bereiten sie auf. Die Neuronen werden direkt auf dem Sensorfeld in einer Nährlösung am Leben gehalten und können dort zu einem funktionierenden neuronalen Netz zusammenwachsen. Da die Sensoren so extrem dicht gepackt sind, wird jede Zelle von mindestens einem von ihnen kontaktiert. Dadurch gelingt es, die Funktionsweise von Nervengeweben über Wochen hinweg haargenau zu beobachten. Außerdem lässt sich detailliert verfolgen, wie die Zellverbände auf elektrische Stimulation oder bestimmte Substanzen reagieren. *(Infineon Technologies AG, 11. 2. 2003)*

INFINEON TECHNOLOGIES AG, MÜNCHEN

Im Nährmedium über dem Neuro-Chip (oben) wachsen Nervenzellen, deren Aktivität das dichte Sensorfeld feinmaschig registriert.

BIOMECHANIK

DNA im Reißtest

Mit nackter Gewalt riss ein Physiker-Team aus Dänemark und den USA die beiden Stränge der DNA-Doppelhelix auseinander – um zu sehen, wie fest sie aneinander haften. Zunächst verlängerten Claudia Danilowicz und ihre Mitarbeiter an der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts) Virus-DNA an einem Ende um ein kurzes überhängendes Stück. Mit dieser Lasche hefteten sie den einen Strang an das Innere einer Glaskapillare. Den anderen Strang bestückten sie mit magnetischen Kügelchen. Dann legten sie ein Magnetfeld an, das einen konstanten Zug auf die Kügelchen ausübte. War dieser stark genug, konnten die Forscher die Doppelhelix wie einen Reißverschluss öffnen. Allerdings verlief das Auftrennen nicht glatt, sondern ruckartig – manchmal schnell, dann wieder mit langen Pausen. Dies bestätigt theoretische Vorhersagen, wonach der Zusammenhalt der Doppelhelix mit der Reihenfolge ihrer vier Bausteine variiert. Tatsächlich unterscheidet sich die Bindungskraft zwischen den »Basen« Adenin und Thymin von der zwischen Guanin und Cytosin. Auch im lebenden Organismus müssen die verzwirnten DNA-Fäden – zur Vervielfältigung oder zum Ablesen der enthaltenen Information – immer wieder aufgetrennt werden. Danilowicz erhofft sich von ihren Versuchen tiefere Einsichten in die Mechanik dieses Vorgangs. *(Proceedings of the National Academy of Sciences, 18. 2. 2003, S. 1694)*

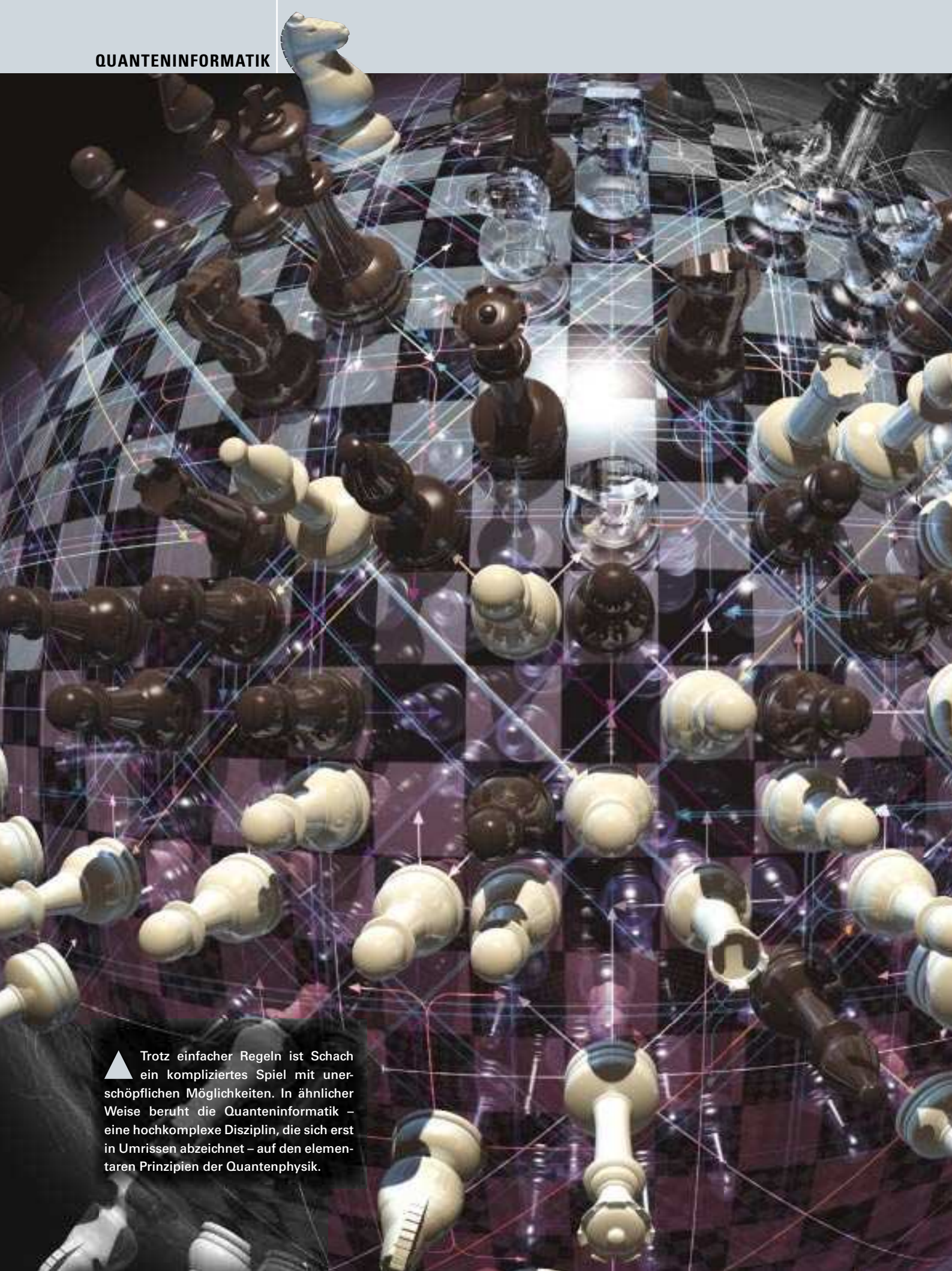
VERHALTENSFORSCHUNG

Auch beim Kuss gilt rechts vor links

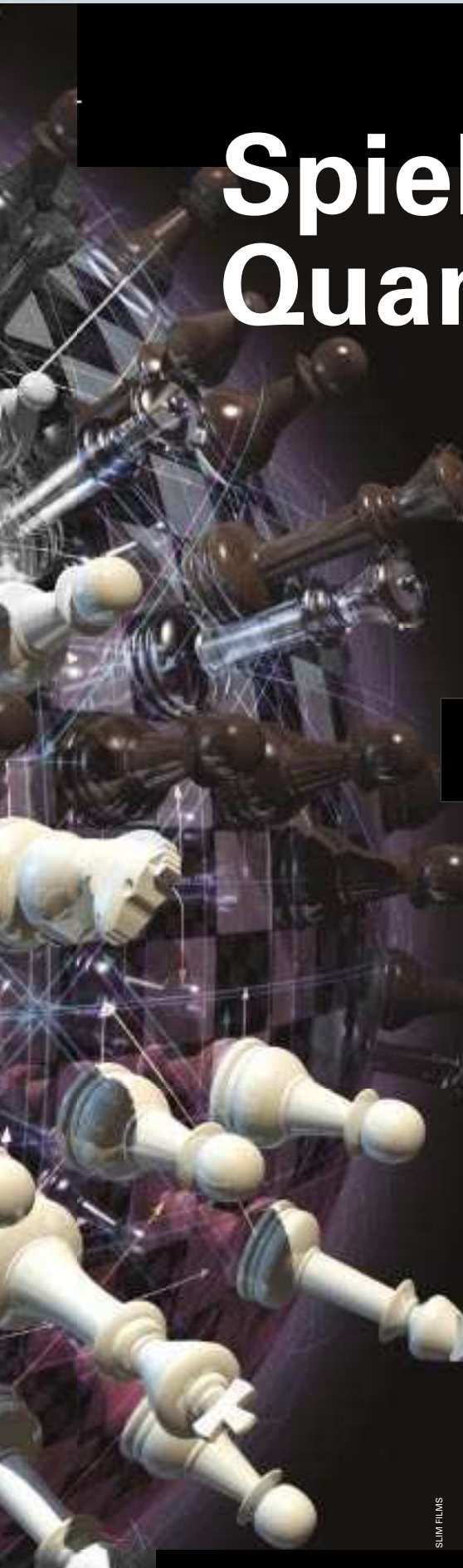
»Wohin gehen die Nasen?« fragt Ingrid Bergmann als Partisanin Maria in »Wem die Stunde schlägt« ihren Filmpartner Gary Cooper. Doch wie die meisten Kuss-Novizen schafft sie es, durch unwillkürliches Neigen des Kopfes die drohende Kollision zu vermeiden. Damit das Manöver klappt, müssen die Beteiligten freilich koordiniert agieren. Warum gibt es dabei nur selten Missverständnisse? Auf der Suche nach der Antwort beobachtete Onur Güntürkün von der Universität Bochum in Deutschland, der Türkei und den USA 124 Paare beim spontanen Küssen. Und siehe da – wie bei der Rechtshändigkeit gibt es auch hier eine angeborene Präferenz: Fast zwei Drittel der Küssenden neigten den Kopf nach rechts. »Wieso?«, fragte sich Güntürkün – und konnte auch dieses Rätsel lösen. Schon Babys drehen den Kopf bevorzugt nach rechts. Vermutlich gibt es also eine genetische Disposition für diese Bewegungsrichtung, von der Küssende profitieren. *(Nature, 13. 2. 2003, S. 711)*

RODIN-MUSEUM PARIS

Auch Rodins Liebende neigen ihre Köpfe zum Küssen nach rechts.



Trotz einfacher Regeln ist Schach ein kompliziertes Spiel mit unerschöpflichen Möglichkeiten. In ähnlicher Weise beruht die Quanteninformatik – eine hochkomplexe Disziplin, die sich erst in Umrissen abzeichnet – auf den elementaren Prinzipien der Quantenphysik.



SLIM FILMS

Spielregeln für Quantencomputer

Künftige Quantenrechner werden mit komplexen Überlagerungen von Bits arbeiten statt mit einfachen Folgen von Nullen und Einsen. Exotische Phänomene wie Verschränkung und Teleportation ermöglichen ungeahnte Rechengeschwindigkeit, abhörsichere Datenübertragung und quantenmechanische Fehlerkorrektur.

Von Michael A. Nielsen

Aus einfachen Regeln kann höchst komplexes Verhalten hervorgehen. Ein gutes Beispiel ist Schach. Ein erfahrener Spieler würde bald erkennen, dass sein Gegenüber zwar die Regeln beherrscht, aber eigentlich von Schach nichts versteht: Der Gegner macht absurde Züge, opfert zum Beispiel seine Königin für einen Bauern und verliert ohne Grund einen Turm. Kurz, der andere weiß nicht, worum es bei Schach geht. Er hat keine Ahnung von den strategischen Prinzipien und Erfolgsgeheimnissen, über die ein geübter Spieler verfügt. Diese übergeordneten Prinzipien sind »emergente« Eigenschaften des Spiels; sie folgen nicht unmittelbar aus den Regeln, sondern ergeben sich aus Wechselwirkungen zwischen den Figuren auf dem Brett.

Den Wissenschaftlern geht es gegenwärtig mit der Quantenmechanik wie einem Anfänger beim Schach. Seit mehr als siebzig Jahren kennen wir die Regeln und ein paar schlaue Züge, die in speziellen Situationen funktionieren, aber wir lernen erst mühsam die strategischen Prinzipien, die für ein geschicktes Gesamtspiel nötig wären.

Diese Prinzipien zu entdecken ist Ziel einer neuen Disziplin, der Quanteninformatik. Viele einschlägige Artikel konzentrieren sich auf technische Anwendungen, etwa auf die »Teleportation« von Quantenzuständen über makroskopische Entfernungen oder auf die Kryptografie, das absolut abhörsichere Verschlüsseln von Botschaften. Informatiker entwerfen Algorithmen für hypothetische Quantencomputer, die viel schneller arbeiten würden als die besten klassischen Rechner.

So faszinierend all diese Technologien sein mögen – genau besehen sind sie nur Nebenprodukte einer neuen Grundlagenforschung. Anwendungen wie die Teleportation spielen eine ähnliche Rolle wie die Dampfmaschine, die im 18. und 19. Jahrhundert die Entwicklung der Thermodynamik anregte. Die Thermodynamik war die Antwort auf grundlegende Fragen über den Zusammenhang von Energie, Wärme und Temperatur, über die Umwandlung dieser Größen in physikalischen Prozessen und über die Schlüsselrolle der Entropie. In ähnlicher Weise erforschen Quanteninformatiker die Beziehung zwischen klassischen und quantenphysikalischen Informationseinheiten, neuartige Methoden der Quanteninformationsverarbeitung so ▷

▷ wie die entscheidende Bedeutung der so genannten Verschränkung, einer seltsamen Verbindung zwischen räumlich getrennten Quantenobjekten.

In populären Darstellungen wird Verschränkung oft als Alles-oder-Nichts-Eigenschaft dargestellt: Quantenteilchen sind entweder verschränkt oder nicht. Wie die Quanteninformatik zeigt, ist Verschränkung eine quantifizierbare physikalische Größe – darin der Energie vergleichbar –, die Informationsverarbeitungsprozesse ermöglicht. Manche Systeme haben nur wenig Verschränkung, andere haben viel davon. Je mehr Verschränkung einem System zur Verfügung steht, desto besser eignet es sich zur Verarbeitung von Quanteninformation. Unterdessen haben die Forscher begonnen, quantitative Verschränkungsgesetze – analog zu den thermodynamischen Gesetzen für die Energie – zu entwickeln; aus ihnen folgt eine Gruppe allgemeiner Prinzipien für das Entstehen von Verschränkung und für deren Nutzung bei der Informationsverarbeitung.

Komplexität in der Quantenwelt

Die Quanteninformatik ist eine so junge Disziplin, dass die Experten noch darüber streiten, worin ihr Wesen besteht und um welche Fragen es hauptsächlich geht. Dieser Artikel gibt meine persönliche Überzeugung wieder, wonach das Hauptziel die Entwicklung allgemeiner Prinzipien ist – zum Beispiel von Verschränkungsgesetzen –, mit deren Hilfe wir komplexe Quantensysteme verstehen können.

Die meisten Untersuchungen der Komplexität konzentrieren sich auf Systeme wie das Wetter oder Sandhaufen, die nicht quantenphysikalisch, sondern rein klassisch beschrieben werden. Das ist kein Wunder, denn komplexe Systeme sind in der Regel makroskopisch, bestehen aus vielen Teilen und zeigen keine Quanteneigenschaften. Der Übergang von quantenmechanischem zu klassischem Verhalten tritt ein, weil große Quantensysteme normalerweise lebhaft mit ihrer Umgebung wechselwirken und dabei durch so genannte Dekohärenz ihre Quanteneigenschaften verlieren (siehe Spektrum der Wissenschaft 4/2001, S. 68).

Ein Beispiel für Dekohärenz ist Schrödingers Katze, benannt nach einem berühmten Gedankenexperiment des österreichischen Physikers Erwin Schrödinger (1887–1961). Theoretisch verharrt das in eine Schachtel gesperrte Tier in einem seltsamen Quantenzustand zwischen tot und lebendig. Doch in Wirklichkeit tritt das Tier mit der Schachtel durch Austausch von Licht, Wärme und Schall in Wechselwirkung und ebenso die Schachtel mit dem Rest der Welt. Binnen Nanosekunden (milliardstel Sekunden) zerstören diese Prozesse die Quantenzustände in der Schachtel und ersetzen sie durch Zustände, die in guter Näherung mit den Gesetzen der klassischen Physik zu beschreiben sind. Die Katze im Innern ist darum entweder lebendig oder tot – und nicht in einem mysteriösen nichtklassischen Überlagerungszustand.

Um an einem komplexen System echtes Quantenverhalten zu beobachten, muss man das System möglichst vollständig vom Rest der Welt isolieren. Bei kleinen Systemen – etwa einzelnen Atomen, die in einer evakuierten Magnetfalle schweben – lässt sich das relativ leicht erreichen, doch bei größeren Gebilden, die komplexes Verhalten zeigen können, ist es viel schwieriger. Zufällige Entdeckungen wie die der Supraleitung oder des Quanten-Hall-Effekts zeigen allerdings, dass Physiker im Labor große, gut isolierte Quantensysteme zuwege bringen und dass die einfachen Regeln der Quantenmechanik zu emergentem komplexem Verhalten führen können.

Das Abc der Informatik

Wir versuchen die übergeordneten Prinzipien, die für komplexe Quantenphänomene gelten, durch Abstrahieren, Anpassen und Erweitern aus Regeln der klassischen Informationstheorie zu gewinnen. Im Jahre 2001 schlug Benjamin W. Schumacher vom Kenyon College in Gambier (Ohio) vor, die wesentlichen Elemente der Informatik – ob klassisch oder quantenphysikalisch – in drei Schritten zusammenzufassen:

1. Identifiziere einen physikalischen Träger. Das klassische Beispiel ist eine Folge von Bits. Obwohl man sich Bits oft als abstrakte Gebilde vorstellt – Nullen und Einsen –, ist jegliche Information unweigerlich in realen physikalischen Objekten kodiert, und darum sollte eine Bitfolge als physikalischer Träger betrachtet werden.
2. Identifiziere eine Datenverarbeitungsprozedur, die mit Hilfe des physikalischen Trägers von Schritt 1 ausgeführt werden kann. Ein klassisches Beispiel ist die zweistufige Aufgabe, den Output einer Datenquelle – beispielsweise den Text eines Buches – zunächst in eine Bitfolge zu komprimieren, diese dann wieder zu dekomprimieren und somit die ursprüngliche Information aus der komprimierten Bitfolge zurückzugewinnen.
3. Identifiziere ein Kriterium für das erfolgreiche Ausführen von Schritt 2. In unserem Beispiel könnte das Kriterium sein, dass der Output der Dekompressionsstufe perfekt dem Input der Kompressionsstufe entspricht.

Die fundamentale Frage der Informatik lautet dann: »Wie viel Trägersubstanz (1) brauchen wir mindestens, um die Datenverarbeitungsaufgabe (2) entsprechend dem Erfolgskriterium (3) auszuführen?« Obwohl diese Frage nicht die gesamte Informatik umfasst, liefert sie eine kräftige Linse, durch die sich ein großer Teil der Forschung auf diesem Gebiet betrachten lässt (siehe Kasten rechts).

Das Beispiel der Datenkompression führt auf eine Grundfrage der klassischen Informationstheorie: Wie viele Bits sind mindestens erforderlich, um die von einer Quelle erzeugte Information zu speichern? Dieses Problem wurde 1948 von Claude E. Shannon in seinen grundlegenden Arbeiten zur Informationstheorie gelöst. Shannon definierte den von einer Informationsquelle produzierten Informationsgehalt als die mi-

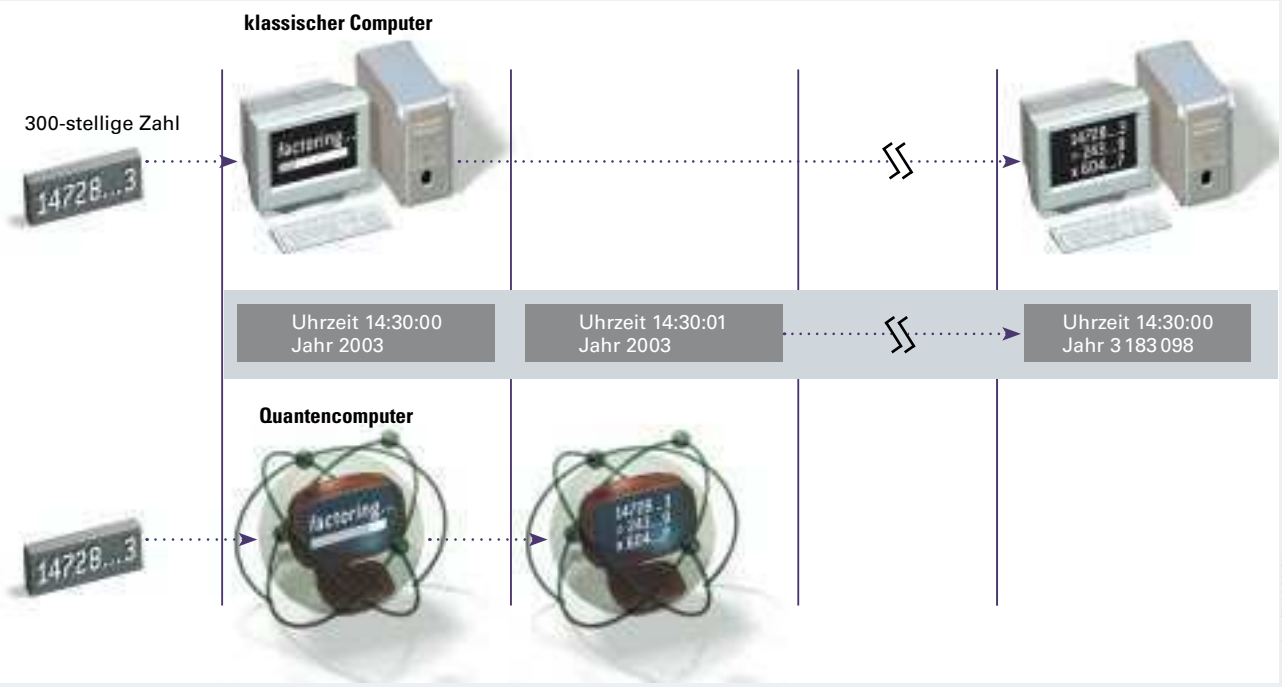
IN KÜRZE

- In der klassischen **Informatik** ist die Informationseinheit das Bit mit zwei Werten – entweder null oder eins. Die Quantenphysik erlaubt aber das Rechnen mit Quantenbits oder Qubits, die als Superpositionen von Nullen und Einsen existieren. Gruppen von Qubits können zudem »verschränkt«, das heißt aufs Engste korreliert sein, sogar über makroskopische Entfernungen hinweg.
- **Quantencomputer**, die mit Qubits – insbesondere mit verschränkten – arbeiten, vermögen im Prinzip schneller zu rechnen als jeder klassische Computer. Die Verschränkung lässt sich quantifizieren und spielt in der Quanteninformatik eine ähnliche Rolle wie die Energie in der Wärmelehre.
- Die **Quanteninformatik** versucht allgemeine Prinzipien für komplexe Quantensysteme zu formulieren. Diese übergeordneten Prinzipien verhalten sich zu den Gesetzen der Quantenmechanik ähnlich wie die Strategie eines geübten Schachspielers zu den elementaren Schachregeln.

Die Grundfrage der Informatik

Die Informatik – ob klassisch oder quantenmechanisch – sucht Antworten auf die fundamentale Frage: »Welche Menge eines Informationsträgers ist nötig, um eine bestimmte Datenverarbeitungsaufgabe auszuführen?«

Zum Beispiel: »Wie viele Rechenschritte sind erforderlich, um die Primfaktoren einer 300-stelligen Zahl zu finden?« Der beste klassische Algorithmus würde dafür rund 5×10^{24} Rechenschritte brauchen – oder mit Terahertz-Geschwindigkeit (10^{12} Schritte pro Sekunde) rund 150 000 Jahre. Ein Quanten-Faktorierungsalgorithmus könnte eine Superposition unzähliger Quantenzustände nutzen und würde nur 5×10^{10} Schritte benötigen, oder bei Terahertz-Geschwindigkeit weniger als eine Sekunde.



nimale Anzahl von Bits, die nötig sind, um den Output der Quelle zuverlässig zu speichern. Der entsprechende mathematische Ausdruck für den Informationsgehalt wird heute als Shannon-Entropie bezeichnet.

Sie löst ein einfaches Grundproblem der klassischen Datenverarbeitung. Darum ist es kein Wunder, dass die Shannon-Entropie auch bei der Analyse viel komplexerer Prozesse weiterhilft. Sie spielt nicht nur eine zentrale Rolle bei der Berechnung der maximalen Datenmenge, die zuverlässig durch einen verrauschten Kanal übertragen werden kann, sondern auch bei der Analyse von Glücksspielen und Aktienmärkten. In der Informatik gilt generell, dass Fragen zu elementaren Vorgängen zu einheitlichen Konzepten führen, die das Verstehen komplexerer Vorgänge ermöglichen.

In der Quanteninformatik nehmen alle drei Schritte auf Schumachers Liste reichere Gestalt an. Welche neuartigen physikalischen Träger vermag die Quantenmechanik zu liefern? Welche Datenverarbeitungsprobleme können wir damit lösen? Wie lauten geeignete Erfolgskriterien? Zu den Trägern gehören nun Zustandsüberlagerungen wie die zugleich lebende und tote Katze in Schrödingers Gedankenexperiment. Die Informationsverarbeitung kann das Manipulieren von Verschränkungen – mysteriösen Quantenkorrelationen – zwischen weit entfernten Objekten umfassen. Die Erfolgskriterien werden subtiler als im klassischen Fall, denn um das Resultat einer Quanteninformationsverarbeitung zu gewinnen, müssen wir das System beobachten – aber durch einen solchen Messvorgang wird es fast unvermeidlich verändert, und die speziellen, für die Quantenphysik typischen Zustandsüberlagerungen werden zerstört.

Qubits – idealisierte Quantenobjekte

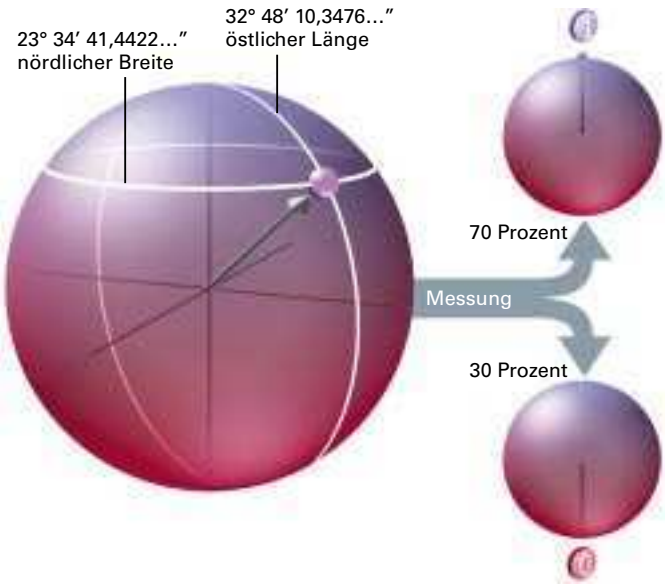
Die Quanteninformatik beginnt mit dem Verallgemeinern der fundamentalen Träger klassischer Information, der Bits, zu so genannten Quantenbits oder kurz Qubits (gesprochen »kjubits«). Bits sind idealisierte, aus den Prinzipien der klassischen Physik abstrahierte Objekte; ebenso sind die Qubits idealisierte Quantenobjekte. Bits können durch magnetische Gebiete auf Bändern oder Scheiben repräsentiert werden, durch Spannungen in Stromkreisen oder durch Bleistiftzeichen auf Papier. Als Bits funktionieren diese klassisch-physikalischen Zustände unabhängig davon, wie sie im Detail realisiert sind. Ebenso sind die Eigenschaften eines Qubits unabhängig von seiner speziellen physikalischen Repräsentation – etwa als Spin eines Atomkerns oder als Polarisation eines Lichtquants.

Ein Bit wird durch seinen Zustand beschrieben: null oder eins. Analog ist ein Qubit durch seinen Quantenzustand definiert. Zwei mögliche Quantenzustände eines Qubits entsprechen der Null und Eins eines klassischen Bits. Doch in der Quantenmechanik hat jedes Objekt, das zwei verschiedene Zustände einnehmen kann, notwendigerweise einen Bereich anderer möglicher Zustände, so genannter Superpositionen, das heißt unterschiedlicher Überlagerungen beider Zustände. Die Qubit-Zustände entsprechen Punkten auf einer Kugelfläche mit null und eins als Süd- und Nordpol (siehe Kasten Seite 52). Das Kontinuum der Zustände zwischen ▷

Was sind Qubits?

Ein klassisches Bit kann einen von zwei Zuständen einnehmen: 0 oder 1. Es kann physikalisch durch einen Transistor dargestellt werden, der auf Ein oder Aus geschaltet ist, oder abstrakt durch einen Pfeil, der auf- oder abwärts weist.

Ein Quantenbit oder Qubit hat viele mögliche Zustände – hier durch einen Pfeil dargestellt, der vom Zentrum einer Kugel zu einem Punkt auf ihrer Oberfläche weist. Der Nordpol entspricht dem Zustand 1, der Südpol dem Zustand 0. Die anderen Punkte bezeichnen Quantensuperpositionen von 0 und 1.



Ein Qubit enthält scheinbar unendlich viel Information, weil seine Koordinaten eine unendliche Folge von Ziffern kodieren können. Doch die im Qubit verborgene Information muss ihm durch eine Messung entlockt werden, und nach den Gesetzen der Quantenmechanik kann das Messresultat immer nur ein gewöhnliches Bit sein: 0 oder 1. Allerdings hängt die Wahrscheinlichkeit jedes Resultats von der »geografischen Breite« des Qubits ab.

BRYAN CHRISTIE DESIGN

▷ null und eins hat viele ungewöhnliche Eigenschaften der Quanteninformation zur Folge.

Wie viel klassische Information können wir in einem Qubit speichern? Man könnte meinen, die Informationsmenge sei unendlich groß. Um einen Quantenzustand zu spezifizieren, müssen wir die geografische Länge und Breite des entsprechenden Punkts auf der Kugel angeben, und im Prinzip kann beides mit beliebiger Genauigkeit geschehen. Diese Zahlen können als lange Bitfolge kodiert werden. Zum Beispiel könnte 011101101… einen Zustand mit einer Länge von 01 Grad, 11 Minuten und 01,101… Sekunden bezeichnen.

Diese Annahme ist zwar plausibel, aber falsch. Man kann eine unendliche Menge klassischer Information in einem einzigen Qubit kodieren, vermag aber diese Information niemals wieder aus dem Qubit zurückzugewinnen. Der einfachste Versuch, den Qubit-Zustand abzulesen, wäre eine direkte Messung, doch sie ergibt als Resultat entweder null oder eins, Süd- oder Nordpol, wobei die Wahrscheinlichkeit jedes Resultats von der geografischen Breite des ursprünglichen Zustands abhängt. Wir könnten zwar eine andere Messung vornehmen, etwa mit der Achse Azoren-Melbourne statt der Nord-Süd-Achse, aber wieder würden wir nur ein Bit an Information gewinnen; dessen Wahrscheinlichkeiten würden nur anders von Länge und Breite des Zustands abhängen. Stets löscht die Messung die gesamte im Qubit enthaltene Information bis auf das einzige Bit, das herauskommt.

Komprimierte Daten

Die Regeln der Quantenmechanik verbieten uns, jemals mehr als ein einziges Bit an Information zu gewinnen – selbst wenn wir das Qubit noch so geschickt kodieren oder es später noch so raffiniert messen. Dieses überraschende Resultat wurde 1973 von Alexander S. Holevo am Mathematischen Steklow-Institut in Moskau bewiesen, nachdem es schon 1964 von J. P. Gordon an den AT&T-Bell-Laboratorien in Murray Hill (New Jersey) vermutet worden war. Das Qubit enthält gewissermaßen verborgene Information, die wir zwar manipulieren, aber nicht direkt erreichen können. Allerdings sollten wir diese verborgene Information nicht als eine unendliche Anzahl unzugänglicher klassischer Bits betrachten, sondern als eine einzige Quanteninformation.

Man beachte, wie dieses Beispiel in Schumachers Schema der Informatik passt. Gordon und Holevo fragten, wie viele Qubits (physikalischer Träger) nötig sind, um eine vorgegebene Menge an klassischer Information (die Aufgabe) so zu speichern, dass die Information verlässlich zurückgewonnen werden kann (das Erfolgskriterium). Außerdem führten sie einen mathematischen Begriff ein, das so genannte Holevo-Chi, das seither zur vereinfachten Analyse komplexer Phänomene dient; insofern ähnelt es der Shannon-Entropie. Beispielsweise hat Michael Horodecki von der Universität Gdansk (Polen) gezeigt, dass mit dem Holevo-Chi das Problem der Kompression von Quantenzuständen, die von einer Quanteninformationsquelle erzeugt wurden, analysiert werden kann – analog zu der klassischen Datenkompression, die Shannon einst betrachtete.

Schon einzelne Qubits sind interessant, aber noch faszinierender ist das ge-

meinsame Verhalten mehrerer Qubits. Für die Quanteninformatik ist typisch, dass Gruppen von zwei oder mehr Quantenobjekten verschränkte Zustände bilden können. Solche Zustände haben völlig andere Eigenschaften als die Objekte der klassischen Physik und werden allmählich als neuartige physikalische Träger für die Datenverarbeitung betrachtet.

Schrödinger war von der Verschränkung so beeindruckt, dass er sie 1935 – im Geburtsjahr seiner berühmten Quantenkatze – in einer grundlegenden Arbeit als das wesentlichste Merkmal der Quantenphysik bezeichnete, das ihre völlige Abkehr von klassischen Gedankengängen erzwinge. Die Mitglieder einer verschränkten Ansammlung von Objekten haben keine individuellen Quantenzustände; nur die Gruppe als ganze besitzt einen wohl definierten Zustand (siehe Kasten Seite 54). Dieses Phänomen ist noch viel seltsamer als eine Zustandsüberlagerung eines einzelnen Teilchens. Ein solches Teilchen hat einen wohl definierten Quantenzustand, selbst wenn dieser Zustand eine Superposition unterschiedlicher klassischer Zustände sein mag.

Verschränkte Objekte verhalten sich, als wären sie über beliebige Entfernungen hinweg miteinander verbunden – ihr Abstand schwächt die Verschränkung nicht im Geringsten. Wenn etwas mit anderen Objekten verschränkt ist, liefert seine Messung gleichzeitig Information über die Partner. Das verleitet manchmal zu der irrtümlichen Idee, man könnte mittels Verschränkung Signale mit Überlichtgeschwindigkeit senden und auf diese Weise Einsteins Spezielle Relativitätstheorie verletzen; doch das probabilistische Wesen der Quantenmechanik verurteilt solche Versuche zum Scheitern.

Anfangs wurde die Verschränkung als Kuriosität betrachtet und von den Physikern weitgehend ignoriert. Das änderte sich erst in den 1960er Jahren, als John S. Bell bei Cern, dem europäischen Laboratorium für Teilchenphysik bei Genf, theoretisch nachwies, dass physikalische Experimente mit verschränkten Quantenzuständen eindeutige Unterschiede zwischen Quantenmechanik und klassischer Physik feststellen können. Wie Bell vorhersagte und spätere Experimente bestätigten, zeigen verschränkte Quantensysteme ein Verhalten, das in einer klassischen Welt absolut unmöglich ist – unmöglich selbst dann, wenn man versucht, die physikalischen Gesetze so abzuändern, dass das Quantenverhalten in irgendeinen klassischen Rahmen passt. Die Verschränkung ist ein derart fremdartiger Wesenzug unserer Welt, dass sogar Experten damit größte Schwierigkeiten haben. Zwar kann man den mathematischen Formalismus der Quantentheorie benutzen, um das Phänomen zu untersuchen, doch sobald man sich mit Analogien zu helfen sucht, besteht die große Gefahr, dass die klassische Grundlage solcher Vergleiche in die Irre führt.

Anfang der 1990er Jahre kamen Forscher auf die Idee, die Verschränkung als Träger für neuartige Formen der Informationsverarbeitung zu nutzen. Artur K. Ekert von der Universität Cambridge zeigte 1991, wie man damit Kodes abhörsicher verbreiten kann. Ein Jahr später gaben Charles H. Bennett von der IBM-Forschungsabteilung in Yorktown Heights (New York) und Stephen Wiesner von der Universität Tel Aviv (Israel) ein Verfahren namens superdichte Kodierung an; dabei überträgt ein Teilchen, das normalerweise nur ein Bit klassische Information aufzunehmen vermag, mittels Verschränkung zwei Bits. 1993 beschrieb ein internationales Team von sechs Forschern, wie ein Quantenzustand durch Verschränkung von einem Ort zum anderen transportiert werden kann, und 1997 gelang einem Team um Anton Zeilinger an der Universität Innsbruck (Österreich) der experimentelle Nachweis dieser »Teleportation« mit Lichtquanten.

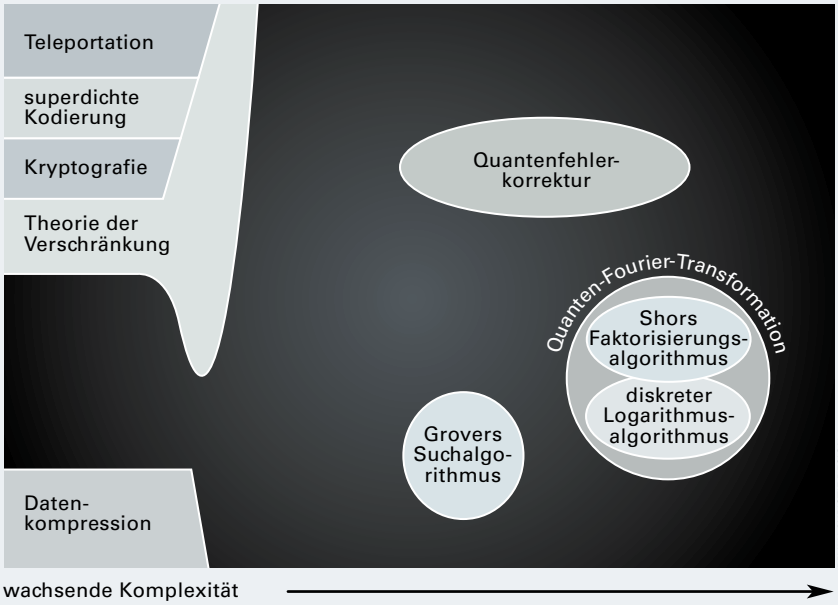
Ein Maß der Verschränkung

So wie ein einzelnes Qubit durch viele verschiedene physikalische Objekte repräsentiert werden kann, hat auch die Verschränkung gewisse Eigenschaften unabhängig von ihrer physikalischen Realisierung. Zum Beispiel könnte man die Quantenkodierung mit einem verschränkten Paar von Photonen oder von Atomkernen durchführen – oder sogar mit einem Photon, das mit einem Atomkern verschränkt ist.

Diese Unabhängigkeit legt eine Analogie zwischen Verschränkung und Energie nahe. Die Energie gehorcht den Gesetzen der Thermodynamik unabhängig davon, ob es sich um chemische, nukleare oder eine andere Energieform handelt. Ließe sich eine allgemeine Theorie der Verschränkung entwickeln, die den Gesetzen der Thermodynamik ähnelt? ▷

Eine Landkarte der Quanteninformatik

Die Quanteninformatiker können derzeit nur eine grobe Karte ihres jungen Forschungsgebiets skizzieren. Einfachere Prozesse wie Teleportation und Quantenkryptografie sind schon recht gut erforscht. Hingegen liegen komplexe Phänomene wie Quantenkorrektur und Peter W. Shors Faktorisierungsalgorithmus wie Inseln in unbekanntem Terrain. Um die Kluft zwischen Einfachem und Komplexem zu überbrücken, arbeiten die Quanteninformatiker an einer umfassenden Theorie, in der die Verschränkung eine ähnliche Rolle spielen soll wie die Energie in der Thermodynamik.

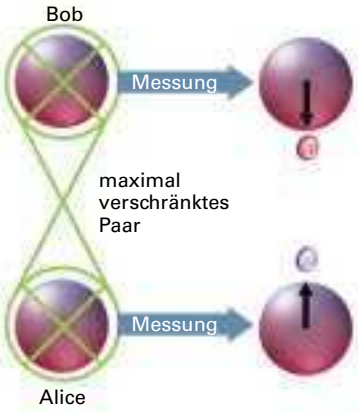


Verschränkung und Teleportation

Könnten Würfel »verschränkt« werden wie Quantenteilchen, so würde jedes verschränkte Würfelpaar stets die gleiche Augenzahl zeigen, selbst wenn die beiden Partner Lichtjahre voneinander entfernt geworfen würden.

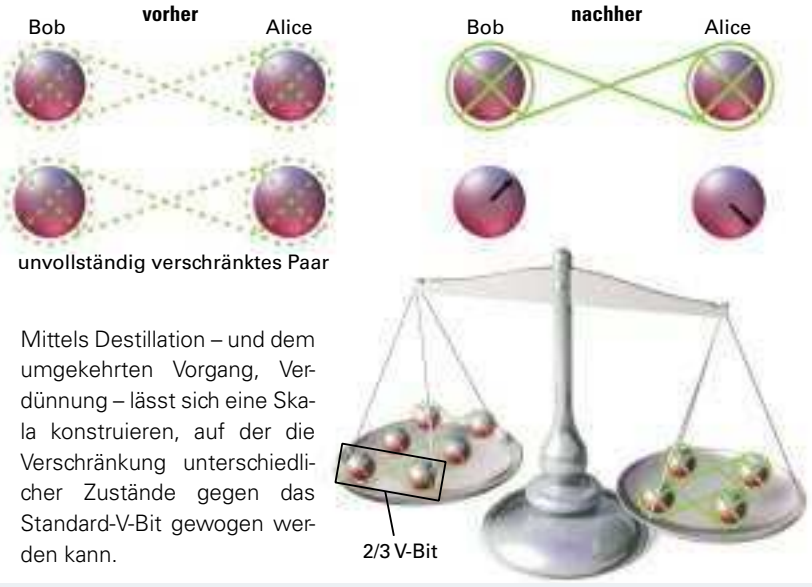
Das Standard-V-Bit

Zwei verschränkte Qubits besitzen einen gemeinsamen Quantenzustand, der das Verhalten beider Qubits korreliert. Maximal verschränkte Qubits ergeben beispielsweise bei jeder Messung stets entgegengesetzte Resultate: Wenn man bei dem einen 0 misst, zeigt das andere 1 und umgekehrt. Ein maximal verschränktes Paar trägt ein »V-Bit« an Verschränkung.



Das Wägen der Verschränkung

Unvollständig verschränkte Paare tragen weniger als ein V-Bit. Wenn Alice und Bob zwei teilweise verschränkte Paare unter sich aufteilen, können sie die Verschränkung »destillieren« und auf ein Paar übertragen. Wenn die Destillation ein maximal verschränktes Paar erzeugt, wissen Alice und Bob, dass ihre Paare ursprünglich insgesamt wenigstens ein V-Bit an Verschränkung trugen.

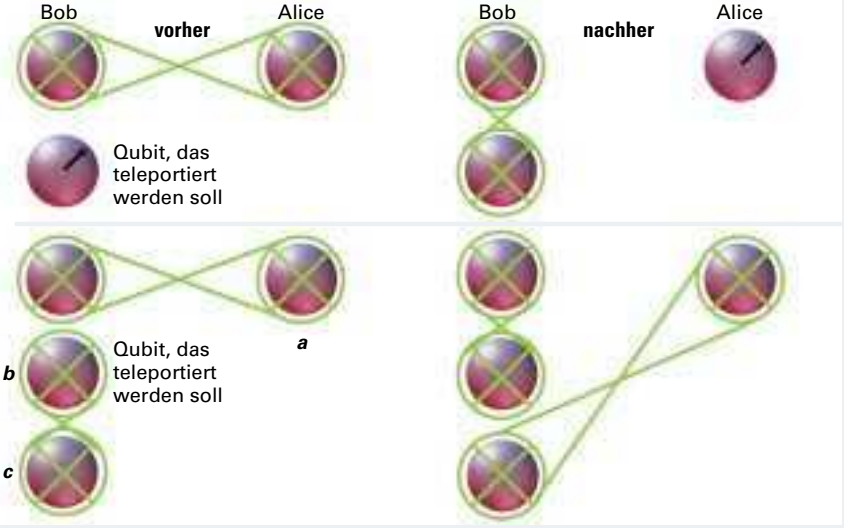


Mittels Destillation – und dem umgekehrten Vorgang, Verdünnung – lässt sich eine Skala konstruieren, auf der die Verschränkung unterschiedlicher Zustände gegen das Standard-V-Bit gewogen werden kann.

Quantenteleportation

Wenn Alice und Bob ein V-Bit unter sich aufteilen, können sie einander ein Qubit mittels Teleportation übertragen. Das gemeinsame V-Bit wird dabei »aufgebraucht«: Nach der Teleportation ist es nicht mehr aufgeteilt.

Wenn Bob einen Partner (b) eines verschränkten Paars zu Alice teleportiert, wird die Verschränkung dieses Teilchens mit seinem ursprünglichen Partner (c) auf Alices Teilchen (a) übertragen. Alice und Bob können aber die Teleportation nicht verwenden, um ihr Guthaben an gemeinsamen V-Bits aufzustocken.



BRYAN CHRISTIE DESIGN

▷ Diese Hoffnung verstärkte sich Ende der 1990er Jahre, als Forscher nachwiesen, dass verschiedene Verschränkungsformen äquivalent sind: Die Verschränkung eines Zustands kann auf einen anderen übertragen werden – ähnlich wie Energie, die von einem Ladegerät zu einer Batterie fließt. Nun wird versucht, daraus ein quantitatives Maß zu entwickeln. Eine Standardeinheit für Verschränkung wäre mit den vertrauten Einheiten für Masse oder Energie vergleichbar (siehe Kasten links).

Dieser Ansatz gleicht dem Wägen von Massen. Die Masse eines Objekts ist definiert durch die Anzahl der Standardmassen, die zum Ausbalancieren auf einer Waage erforderlich sind. Die Quanteninformatiker haben eine theoretische »Verschränkungswaage« entwickelt, um die Verschränkung in zwei verschiedenen Zuständen zu vergleichen. Der Verschränkungsbetrag in einem Zustand wird festgestellt, indem man nachsieht, wie viele Kopien einer Standardeinheit der Verschränkung nötig sind, den gleichen Effekt zu erzielen. Man beachte: Diese Methode, Verschränkung zu quantifizieren, ist ein weiteres Beispiel für die Grundfrage der Informatik. Wie haben einen physikalischen Träger (Kopien unseres verschränkten Zustands), eine Aufgabe und ein Erfolgskriterium identifiziert. Wir definieren unser Verschränkungsmaß, indem wir fragen, wie viel von unserem Träger wir brauchen, um unsere Aufgabe erfolgreich auszuführen.

Die Entwicklung der Verschränkungstheorie ist ein Beispiel für einen Bottom-up-Ansatz: Wir beginnen mit einfachen Fragen zum Auswägen der Verschränkung und gewinnen daraus allmählich Erkenntnisse über komplexere Phänomene. Hingegen haben Forscher in seltenen Fällen extrem komplizierte Phänomene quasi erraten und dadurch die Quanteninformatik im Top-down-Verfahren ein großes Stück vorangebracht. Das berühmteste Beispiel ist ein Algorithmus, den Peter W. Shor 1994 an den AT&T-Bell-Laboratorien formuliert hat, um mit einem Quantencomputer die Primfaktoren einer zusammengesetzten ganzen Zahl zu bestimmen (Spektrum der Wissenschaft 12/1995, S. 62). Mit den besten Algorithmen für klassische Computer steigt der Rechenaufwand exponentiell mit der Größe der Zahlen, die zu faktorisieren sind. Eine Zahl mit 500 Stellen braucht 100 Millionen Mal so viele Rechenschritte wie eine mit 250 Stellen. Der Aufwand von Shors Algorithmus steigt nur polynomisch: Eine 500-stellige Zahl braucht nur achtmal so viele Schritte wie eine 250-stellige.

Shors Algorithmus ist zwar ein Beispiel für das informationstheoretische Paradigma – wie viel Rechenaufwand ist nötig, um die Faktoren einer ganzen Zahl mit n Bits zu finden –, aber der Algorithmus scheint keine Verbindung zu anderen Resultaten der Quanteninformatik zu haben (siehe Kasten Seite 53). Auf den ersten Blick sieht er eher aus wie ein schlauer Programmiertrick ohne fundamentale Bedeutung. Doch das täuscht: Shors Algorithmus lässt sich als Sonderfall eines Verfahrens zur Bestimmung der Energieniveaus in einem Quantensystem interpretieren – und dieser Vorgang ist offensichtlich fundamental. Mit der Zeit werden wir hoffentlich die Prinzipien, die den Quantenalgorithmen von Shor und anderen zu Grunde liegen, besser verstehen und daraus weitere Rechenprogramme entwickeln.

Exaktes Kopieren verboten

Eine letzte Anwendung ist die quantenmechanische Fehlerkorrektur. Sie liefert den bislang besten Beweis, dass Quanteninformatik eine nützliche Wissenschaft ist. Da empfindliche Quantenzustände leicht durch zufällige Wechselwirkungen zerstört werden, braucht man dringend Methoden, die diesem »Rauschen« entgegenwirken.

Die klassische Computer- und Nachrichtentechnik verfügt über gute Korrekturkodes, um Daten gegen Rauschen zu schützen. Ein einfaches Beispiel ist der Wiederholungskode (siehe Kasten Seite 56). Er stellt das Bit 0 als Folge der drei Bits 000 dar und das Bit 1 als Triplett 111. Wenn das Rauschen schwach ist, stört es vielleicht manchmal eines der Bits in einem Triplett und verwandelt etwa 000 in 010, aber viel seltener gleich zwei Bits pro Triplett auf einmal. Sobald wir einem 010 (oder 100 oder 001) begegnen, können wir fast sicher sein, dass der korrekte Wert 000 ist, das heißt 0.

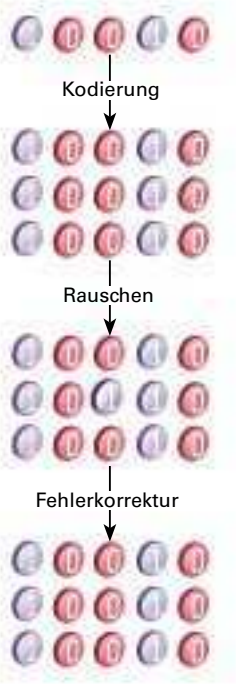
Anfangs schien es unmöglich, Kodes zur Quantenkorrektur zu entwickeln, weil die Quantenmechanik uns verbietet, den unbekannten Zustand eines Quantenobjekts mit Bestimmtheit zu erfahren – erinnern wir uns an die Unmöglichkeit, aus einem Qubit mehr als ein Bit Information herauszuholen. Der klassische Triplett-Kode versagt darum, denn man kann nicht jede Kopie eines Qubits untersuchen und erkennen, dass eine Kopie verworfen werden muss, ohne dabei sämtliche Kopien zu zerstören. Es kommt noch schlimmer: Schon das Herstellen der Kopien ist problematisch. Die Quantenmechanik verbietet das exakte Kopieren eines unbekannten Qubits; dieses Kopierverbot ist als *no-cloning theorem* bekannt.

Mitte der 1990er Jahre wiesen prominente Physiker wie Rolf Landauer von IBM skeptisch darauf hin, dass für Quantencomputer alle bislang bekannten Methoden der Fehlerkorrektur versagen. Doch 1995 zeigten Shor sowie unabhängig davon Andrew M. Steane von der Universität Oxford, wie man eine Quantenkorrektur durchführen kann, ohne die Zustände der Qubits zu kennen oder sie kopieren zu müssen. Wie beim Triplett-Kode wird jeder Wert durch eine Gruppe von Qubits dargestellt. Diese Qubits passieren einen Schaltkreis mit logischen Quantengattern, die jeden Fehler korrigieren, ohne ▷

Fehlerkorrektur – klassisch und quantenmechanisch

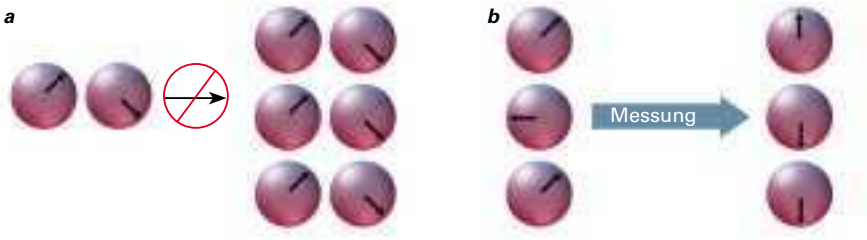
Klassischer Wiederholungskode

Dieses einfache Verfahren zur Fehlerreduktion kodiert jedes Bit als Triplett identischer Bits. Wenn ein Bit durch Rauschen »kippt«, kann der Fehler korrigiert werden, indem das Bit der Mehrheit des Tripletts angeglichen wird.

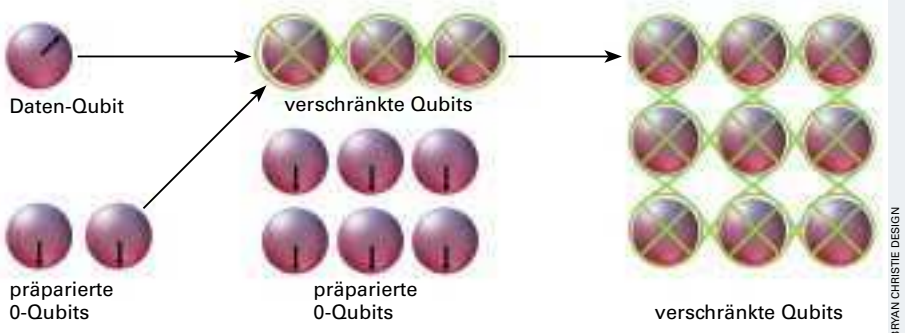


Fehlerkorrektur bei Qubits

Die Wiederholungsstrategie versagt bei Qubits aus zwei Gründen. Erstens können Qubits in unbekannten Zuständen nicht perfekt vervielfältigt werden *(a)*. Zweitens: Selbst wenn Duplikate erzeugt werden – etwa durch mehrfaches Wiederholen der Berechnung –, vermag eine einfache Messung keine Fehler zu entdecken *(b)*.



Ein Quantenkorrekturkode beruht auf der Verschränkung jedes Daten-Qubits mit zwei präparierten 0-Qubits. Diese drei Qubits werden ihrerseits mit sechs anderen verschränkt. Gemeinsames Messen von Qubit-Paaren zeigt an, ob eines dieser neun Qubits fehlerhaft ist und wie es korrigiert werden kann, ohne die individuellen Qubit-Zustände zu zerstören.



▷ tatsächlich alle einzelnen Zustände zu »lesen«. Es ist, als könnte der Schaltkreis einem durchlaufenden Triplett 010 ansehen, dass das mittlere Bit anders ist, und es abändern, ohne die Identität eines der drei Bits bestimmen zu müssen. Dass Quantenkorrekturkodes im Prinzip funktionieren, wurde unterdessen am Los Alamos National Laboratory, bei IBM und am Massachusetts Institute of Technology experimentell demonstriert.

Die Quantenkorrektur verspricht faszinierende Anwendungen. Zum Beispiel wird die Genauigkeit der besten Uhren durch quantenmechanisches Rauschen begrenzt; hier könnte die Quantenkorrektur Abhilfe schaffen. Eine andere Idee stammt von Alexei Kitaev vom California Institute of Technology: Vielleicht besitzen einige physikalische Systeme eine Art natürlicher Rauschtoleranz. Solche Systeme würden praktisch von selbst Quantenkorrekturen durchführen und wären außerordentlich widerstandsfähig gegen Dekohärenz.

Was wird die Zukunft bringen? Mit Schumachers Programm als Richtschnur werden wir gewiss neue Erkenntnisse darüber gewinnen, wie im Universum Information übertragen und verarbeitet wird. Vielleicht wird die Quanteninformatik sogar Systeme in den Blick rücken, die wir bisher nicht unter dem Aspekt der Datenverarbeitung betrachtet haben. Beispielsweise untersucht die Festkörperphysik komplexe Phänomene wie Hochtemperatursupraleitung und fraktionierten Qaunten-Hall-Effekt, bei denen Quantenverschränkung im Spiel ist – aber noch ist unklar, wie. Von der Quanteninformatik werden wir wohl schon bald neue Züge für das nie endende Schachspiel mit dem komplexen Quantenuniversum lernen. ◁

Michael A. Nielsen ist Assistenz-Professor für Physik an der Universität von Queensland in Brisbane (Australien). Er promovierte 1998 als Fulbright-Stipendiat an der Universität von New Mexico. Zusammen mit Isaac L. Chuang vom Massachusetts Institute of Technology verfasste er das erste Lehrbuch der Quanteninformatik: »Quantum Computation and Quantum Information« (Cambridge University Press, 2000).

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Die Physik der Welterkenntnis. Auf dem Weg zum universellen Verstehen. Von David Deutsch. Deutscher Taschenbuch Verlag, München 2000.

The Bit and the Pendulum. Von Tom Siegfried. John Wiley & Sons, 2000.

Quantum Theory and Measurement. Von John A. Wheeler und Wojciech H. Zurek (Hg.). Princeton University Press, 1983.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

1953

Überreste des Peking-Menschen jüngst entdeckt

In der Nähe von Peking sind neue Überreste des Peking-Menschen, Sinanthropus pekinensis, gefunden worden. Es handelt sich um Skelett-Teile. Der Fundort Tschuktien liegt in dem gleichen Gebiet, aus dem der berühmt gewordene Schädelfund des Jahres 1929 stammt, eine der ältesten Hominidenformen der menschlichen Stammesentwicklung. Der Schädel und andere, später entdeckte Knochen dieses Urmenschen sind in den Wirren des Zweiten Weltkrieges verschwunden. *(Universitas, 8. Jg., Heft 4, 1953, S. 422)*

Ein fliegendes Boot

Durch Windkanal-Versuche von Luftforschern bekam man plötzlich … das theoretische Rüstzeug für die Konstruktion eines im Wasser fliegenden Bootes. Wasser ist zwar naß und schwerer als Luft, aber hier gelten dieselben Gesetze der Strömungslehre wie dort. … Die Tragflächen, die sich unter dem Boot befinden, sind im Prinzip nichts anderes als Flugzeugflügel. Da sie unter einem geringen »Anstellwinkel« durchs Wasser bewegt werden, entsteht an der Unterseite der leicht profilierten Fläche ein Druck und an ihrer Oberseite ein Sog. … So wird das Boot aus dem Wasser gehoben … Da es sich bei den Unterwasserflügeln … um scharfe, dünne Messer aus Bronze handelt, verursachen sie in der Fahrtrichtung nur wenig Widerstand. *(Das neue Universum, Bd. 70, 1953, S. 274)*

▼ Das Tragflächenboot »Wing« erreicht eine Geschwindigkeit von 50 km/h.

Entfernungen im Weltall verdoppelt

Eine von W. Baade mit dem 5-m-Reflektor des Palomar-Observatoriums vorgenommene Neubestimmung der Entfernung des Andromeda-Nebels … erbrachte das Ergebnis, daß seine Entfernung etwa doppelt so groß ist, wie bisher angenommen wurde. Ein ähnliches Resultat erhielt H. Shapley für die Magellanschen Wolken … Einige helle Objekte in diesen Sternsystemen konnten als Kugelsternhaufen identifiziert werden … Wenn sie die gleiche Helligkeit wie die galaktischen haben, muß die bisher angenommene Entfernung der beiden Sternsysteme verdoppelt werden. Da diese Abstände die Entfernungsskala des Weltalls wesentlich bestimmen, müssen alle übrigen extragalaktischen Entfernungen ebenfalls verdoppelt werden. *(Die Umschau, Heft 8, 1953, S. 247)*

Sehen Ameisen UV und Röntgen'sche Strahlen?

Nach vollständiger Verdunkelung des Zimmers wurde ein Sonnenspektrum durch eine kleine Oeffnung des Fensters erzeugt, von diesem Spektrum der sichtbare Teil verdeckt und nur die Strahlen des unsichtbaren Teiles jenseits des Violetts auf die Ameisen … geworfen. … Nach viertelstündiger Einwirkung der ultravioletten Strahlen hatten sich alle Ameisen samt ihren Puppen in den von den Strahlen nicht getroffenen Teil der Schachtel zurückgezogen. … Die Röntgenstrahlen dagegen übten nach ebenso langer Einwirkung keinen Einfluss auf die Ameisen aus. *(Naturwissenschaftliche Wochenschrift, Bd XVIII, Nr. 28, 1903, S. 329)*

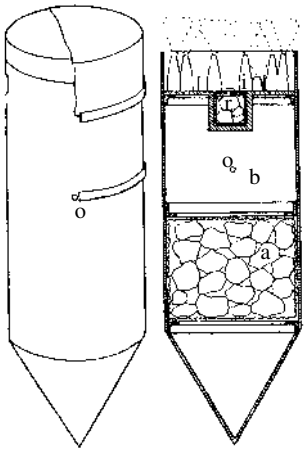
Eine eigenartige Verwendung des Gasteers

Wohl veranlasst durch die in Amerika gemachten Versuche, die Strassen durch Behandeln mit Rohpetroleum staub- und schmutzfrei zu machen, benutzte der italienische Ingenieur G. Rimini den Gasteer zu diesem Behufe. … Er stellte die Versuche an zwei Stellen der Chaussee seines Distrikts Lugo bei Ravenna an, an denen der Verkehr ein besonders lebhafter ist, und fand, dass die Ergebnisse die Erwartungen in jeder Hinsicht übertrafen. Die mit dem Teer behandelten Strecken bedeckten sich bald mit einer harten, fest zusammengebackenen Schicht. … Dieselbe ist völlig staubfrei und das Regenwasser fliesst von ihr ab, ohne eindringen zu können, sodass natürlich auch kein Schmutz gebildet werden kann. Die Farbe des Bodens gleicht der eines recht dunklen Sandes. *(Dinglers Polytechnisches Journal, 84. Jg., Bd. 318, Heft 15, 1903, S. 240)*

1903

Eine unlöschbare Seefackel

In England, Amerika und auch Frankreich ist mit bestem Erfolg bei verschiedenen Rettungswerken auf See eine Acetylenfackel nach Watson angewandt worden, die durch Wasser und Wind nicht verlöscht werden kann. … Beim Eintauchen des Körpers in das Wasser tritt Karbid durch die kleinen Oeffnungen o in die Luftkammer b und berieselt das Calciumkarbid a. … Der Deckel, auf dem die Acetylenbrenner i angebracht sind, trägt noch einen kleinen Rezipienten r, der Calciumphosphatstücke enthält. Der Erfinder hat diese chemische Verbindung gewählt, weil sie am besten ein zuverlässiges Entzünden und eine genügend lange Wirksamkeit sichert. Diese Eigenschaft ist besonders erwünscht, weil die Fackel häufig im Seegang unter Wasser kommt und ausgelöscht wird. Die Wiederentzündung erfolgt dann, solange die Wirksamkeit des Calciumphosphats anhält, explosiv. *(Dinglers Polytechnisches Journal, 84. Jg., Bd. 318, Heft 14, 1903, S. 222)*



▲ Rettungsfackel für die See

Verstümmelt durch Gülle

Menschlicher Einfluss dürfte die Hauptschuld daran tragen, dass weltweit die Amphibien vom Aussterben bedroht sind. Überdüngung trägt dazu bei, dass auch Missbildungen in den letzten Jahren überhand nehmen.

Von Andrew R. Blaustein und Pieter T. J. Johnson

Eigentlich wollte die Lehrerin den Schulkindern nur das Leben in einem Feuchtgebiet zeigen. Sie führte die Klasse an diesem Tag im Sommer 1995 zu einem Tümpel auf einer Farm in Süd-Minnesota, im Mittleren Westen der USA. Dort sollten die Schüler Leopardfrösche kennen lernen, eine Froschart, die dem Grasfrosch Europas ähnelt.

Bald zappelten die ersten Amphibien in den Keschern. Doch zur allgemeinen Bestürzung hatte einer der jungen Frösche drei Hinterbeine, ein anderer sogar vier. Und das war keine Ausnahme. Die Kinder fingen fast zwei dutzend Leopardfrösche, die Hälfte davon war verkrüppelt.

Die Schule wandte sich an die Umweltschutzbehörde, die ging der Sache sofort nach. Die Bilanz war erschreckend: Die Experten fanden außer zahlreichen Fröschen mit überzähligen, oft völlig deformierten Beinen auch Tiere ohne Hinterbeine oder mit kurzen Stummeln an deren Stelle. Manchen der Tiere sprossen ein oder zwei Gliedmaßen aus dem Bauch. Einigen fehlte ein Auge.

Die Geschichte erregte landesweites Medieninteresse. Vor allem interessierte die Menschen, worauf die Fehlbildungen zurückzuführen waren und ob so etwas auch an anderen Orten vorkam. Wie Nachforschungen ergaben, handelte es sich um keinen Einzelfall, sondern im Gegenteil um ein in Nordamerika sehr häufiges Phänomen. Fehlbildungen von Gliedmaßen sind auch aus Australien, Asien und Europa bekannt, von Europa aber nicht in diesem Ausmaß. Zahlreiche Amphibienarten, auch Salamander und Kröten, sind betroffen. In manchen amerikanischen Populationen weisen achtzig Prozent der Tiere diese schweren Fehlentwicklungen auf.

An sich sind solche Deformationen nichts Neues. Schon vor hundert Jahren berichteten Zoologen, dass sich in jeder Amphibien-Population ein paar missgestaltete Tiere finden. Doch normalerweise fehlte früher höchsten jedem zwanzigsten Exemplar ein Bein, oder es besaß keine Zehen. Noch viel seltener waren Fälle von Fröschen mit fünf oder sechs Beinen. Erst in jüngerer Zeit haben diese Missbildungen nachweislich stark zugenommen.

Bei der Suche nach den Ursachen verdächtigten die Forscher immer wieder andere Umweltfaktoren: bald die zunehmende UV-Strahlung, bald Schadstoffe im Wasser, dann wieder Parasitenbefall. Jeder dieser Einflüsse kann offenbar spezifische Fehlbildungen hervorrufen. Im Einzelfall mag daher ein Faktor dominieren, in anderen Fällen scheinen alle drei zusammenzuwirken. Bedenklich dabei ist, dass alle drei Umweltphänomene mindestens zum Teil auf den Menschen zurückgehen.

Mit Sicherheit tragen die Missbildungen zum weltweiten Amphibiensterben bei, auf das Biologen erstmals 1989 aufmerksam wurden (siehe den Artikel von Blaustein und David B. Wake, SdW 6/1995, S. 58). Gerade Amphibien gelten als Indikator für den Zustand der Biosphäre. Wegen ihrer unbeschalten Eier und durchlässigen Haut reagieren sie auf Missstände in ihrer Umwelt besonders empfindlich. Zu befürchten ist, dass Schadfaktoren, die heute Frösche oder Kröten beeinträchtigen, morgen anderen Tieren zusetzen.

Als Ursache für die zahlreichen Missbildungen geriet sogleich die Ultravioletttstrahlung in Verdacht, die wegen der ausdünnenden Ozonschicht in der Stratosphäre zugenommen hat. Zum einen argwöhnten Wissenschaftler bereits einen Zusammenhang von verstärkter UV-Strahlung mit dem Amphibiensterben. Zum anderen hat-

IN KÜRZE

- Seit Mitte der 1990er Jahre fällt vielerorts eine große Anzahl **missgebildeter Amphibien** auf. Das Phänomen wurde schon bei über sechzig Arten von Fröschen, Kröten und Salamandern in 46 Staaten registriert. In manchen Populationen beträgt die Rate 25 Prozent. Ungewöhnlich sind mancherorts besonders die zahlreichen Tiere mit zu vielen Hinterbeinen.
- Für diese Art von Fehlbildung gerieten drei Ursachen in Verdacht: **ultraviolette Strahlung**; mit **Chemikalien** belastetes Wasser; oder eine **Parasitenepidemie**.
- Offenbar verursacht meist ein **parasitischer Saugwurm** die zusätzlichen Hinterbeine. Dieser Schmarotzer vermehrt sich besonders gut in überdüngten Gewässern.

ten Laborstudien erwiesen, dass UV-Licht die Keimes- und Larvalentwicklung von Amphibien stören kann. Auch bei anderen Lebewesen erzeugt solche Strahlung oft genetische Mutationen und schädigt das Immunsystem. Wie weitere Versuche ergaben, kann UV-Bestrahlung Amphibienembryonen und Kaulquappen töten oder Missbildungen hervorrufen. Bei erwachsenen Fröschen schädigt sie schwer die Augen.

Ob ultraviolette Strahlung auch die Entwicklung der Beine beeinträchtigt, konnten erst in den späten 1990er Jahren Gary Ankley und Mitarbeiter von der Umweltschutzbehörde Minnesotas aufklären. Kaulquappen, die in der Studie vor ultravioletter Strahlung abgeschirmt wurden, entwickelten normale Gliedmaßen. Waren die Kaulquappen aber ungeschützt einer natürlichen Strahlungsdosis ausgesetzt, wuchsen ihnen teils verkümmerte Beine oder Füße.

Falscher Verdacht

Bei den missgestalteten Fröschen aus freier Natur treten zwar auch solche Fehlbildungen auf. Doch die UV-Strahlung erzeugte nicht alle Sorten von Deformationen, wie sie bei den Fröschen aus Tümpeln vorkommen. Vor allem verursacht UV-Strahlung eben nicht überzählige Beine. Dies bestätigten zahlreiche weitere Labor- und Freilandversuche. Davon abgesehen setzen sich Kaulquappen und erwachsene Amphibien selten freiwillig kontinuierlich der vollen Sonnenstrahlung aus. Viele Arten suchen regelmäßig Schatten auf, leben in morastigen Gewässern oder sind ohnehin eher nachtaktiv. ▷

Nordamerikanische Leopardfrösche (Bilder dieser Doppelseite) machten vor einigen Jahren Schlagzeilen. Aus zunächst rätselhaftem Grund tauchten viele verkrüppelte Tiere auf.

FOTOS AUF DIESER DOPPELSEITE: OKAPIA

Ein anderer Verdacht fiel auf Chemikalien unter anderem aus der Landwirtschaft, die Laichgewässer verseuchen könnten. Nach dem grausigen Fund in Minnesota häuften sich ähnliche Meldungen auch von anderen Feuchtgebieten. Auffallend viele davon bezogen sich auf Orte bei Farmen, wo jedes Jahr große Mengen von Mineraldüngern und Pestiziden ausgebracht werden. Mitte der 1990er Jahre ergaben umfangreiche Laborstudien, dass Amphibien auf sehr viele dieser Stoffe äußerst empfindlich reagieren. Viele Substanzen, die heute in die Umwelt gelangen, können für sie tödlich sein. War es aber möglich, dass irgendwelche Chemikalien das Gliedmaßenwachstum in der beobachteten Weise beeinflussten? Und welche aus der fast unübersehbaren Palette könnten das sein?

Schnell geriet das verbreitete Insektizid Methopren in Verruf. Diese Substanz wurde erstmals 1975 zugelassen. In den Sicherheitstest erwies sie sich als viel harmloser für Wirbeltiere als das heute in vielen Staaten verbotene Insektenbekämpfungsmittel DDT, das sich in der Nahrungskette anreichert. Methopren ähnelt dem Juvenilhormon von Insekten, ist also ein sehr spezifischer Wirkstoff, der sich zudem rasch abbaut. Das Insektizid stört Häutung und Verpuppung von Insektenschädlingen und behindert so die Entwicklung zum erwachsenen Tier.

Allerdings ist Methopren chemisch mit den Retinoiden verwandt. Das sind von Vitamin A abgeleitete Produkte, die unter anderem bei einigen Hautkrankheiten – auch Akne – helfen, aber in der Schwangerschaft schwere Missbildungen und Fehlgeburten hervorrufen können. Besonders die Retinsäure oder Vitamin-A-Säure und deren Derivate sind sehr heikel. Zu viel, aber auch zu wenig davon kann in der Entwicklung eines Wirbeltiers schaden.

FRANS LANTING, MINDEN PICTURES

Andrew Blaustein inspiziert missgestaltete Pazifik-Laubfrösche. Larven eines parasitischen Saugwurms verursachen solche Fehlbildungen.

Letzte Verdächtige: Parasiten

Ende der 1990er Jahre ergaben Studien an Fröschen, dass deren Hinterbeine unter größeren Mengen von Vitamin-A-Säure vielfach verkümmert wachsen. Doch Methopren erzeugte in Vergleichstests keinerlei Effekte dieser Art, sondern verursachte überhaupt keine Missbildungen. Als erste Ursache für die Entwicklungsstörungen in Amphibienpopulationen kam Methopren schon deswegen kaum in Frage, weil sich dieses Insektizid im Freien rasch zersetzt. Auch an den Orten, wo sich deformierte Amphibien häufen, scheint sich das Insektenmittel kaum über längere Zeit zu halten, wie gesonderte Messungen ergaben.

Gleiches gilt für 61 andere in der Landwirtschaft verwendete Substanzen und deren Abbauprodukte, deren Wirkung in der Natur Fachleute bisher besonders in Gegenden im Westen der USA untersuchten, wo verunstaltete Frösche oder Kröten zuhauf vorkommen. Damit sind die Pestizide zwar nicht generell jeden Verdachts enthoben. Hunderte von Substanzen wurden bisher in dieser Hinsicht noch nicht überprüft. Es gibt auch Anzeichen, dass manche Pestizide bei Amphibien tatsächlich Körperschäden hervorrufen können. Doch überzählige Beine verursachen auch sie nicht.

Folglich hätten Umweltchemikalien, die in Laichgewässer gelangen, möglicherweise das Potenzial, bei Amphibien Missbildungen zu erzeugen, so wie auch ultraviolette Strahlung Ursache dafür sein könnte. Für die meisten der Fehlentwicklungen haben Wissenschaftler heute aber eine ganz andere Erklärung. Das betrifft vor allem die zusätzlichen Hinterbeine.

Die ersten Anhaltspunkte für die neue These gehen über zwanzig Jahre zurück, doch die Tragweite blieb zunächst unbeachtet. Schon Mitte der 1980er Jahre entdeckte Stephen B. Ruth, der damals am Peninsula College in Monterey (Kalifornien) arbeitete, in Nordkalifornien Hunderte von Amphibien mit Fehlbildungen. Viele der

Warum verschwinden die Amphibien?

Auf der langen Liste bedrohter Arten stehen seit zwei Jahrzehnten zunehmend auch Frösche, Kröten, Salamander und Molche weit vorn. Welche Bedeutung für den weltweiten Rückgang der Amphibienbestände haben die jetzt gehäuft beobachteten Missbildungen?

Behinderte Frösche oder Lurche überleben meist nicht lange. Sofern sie nicht ohnehin bald gefressen werden, dürften sie auch beim Beutefang benachteiligt sein. Das bedeutet, dass in einer Population die meisten dieser Tiere bald verschwinden. Das heißt aber auch, dass ein Bestand mit allzu vielen deformierten Individuen beträchtlich schrumpfen kann, bis hin zum Zusammenbruch. Diese Gefahr ist bei den Parasitenepidemien, wie sie zurzeit viele der Lebensräume in Nordamerika heimsuchen, durchaus gegeben – zumal die Zahl der Infektionen offenbar ansteigt.

Vielerorts schwinden die Amphibien allerdings drastisch, obwohl dort nur selten Missbildungen auftreten. Das zwingt die Wissenschaftler zu dem Schluss, dass Entwicklungsdefekte bei weitem nicht der einzige unmittelbare Anlass für diesen Rückgang sind.

Amphibien bewohnen ein breites Spektrum an Lebensräumen, Feuchtgebiete wie Wüsten, Graslandschaften wie Wälder, Tiefebenen und Hochgebirge. Aber so verschiedenartig ihre ökologischen Nischen auch sind – von den unzähligen menschengemachten schädlichen Einflüssen bleiben sie nur an den wenigsten Orten ganz verschont. Manches wichtige Amphibienhabitat hat der Mensch bereits völlig beseitigt oder praktisch verseucht. In andere hat er fremde Tierarten eingeführt, denen die heimischen Arten nicht standhalten können.

FRANS LANTING, MINDEN PICTURES

Fällt ein Froschhabitat, wie hier im Westen der USA, vorübergehend trocken, halten die Bestände das meist aus. Dauerhafte Umweltveränderungen können Populationen vernichten.

Zu den größten Gefahren gehört die zunehmende UV-Strahlung, die auf die immer stärkere Ausdünnung der Ozonschicht zurückgeht. Starke UV-Strahlung zerstört die wenig geschützten Eier und Larven. Sie kann auch Entwicklungen, etwa von Beinen, verhindern. Andererseits werden bei einer Klimaerwärmung manche Feuchtgebiete trockenfallen, in denen Amphibien leben. In anderen Regionen könnte ein wärmeres Klima Parasiten und Krankheitserreger begünstigen, welche die Amphibienbestände dezimieren. Sollten Maßnahmen Erfolg haben, die das Amphibiensterben generell aufhalten, dürften auch die Missbildungen der letzten Jahre wieder verschwinden.

Pazifik-Laubfrösche (Königslaubfrösche) und Langzehenquerzahnmolche, die er dort in Tümpeln fand, besaßen zu wenige oder zu viele Beine. Auch andere Deformitäten kamen vor. Ruth schlug nicht Alarm, denn er hielt das für eine biologische Kuriosität.

Er bat damals einen Experten – Stanley K. Sessions, der heute am Hartwick College in Oneonta (US-Staat New York) arbeitet –, die bizarren Tiere zu untersuchen. Stanley erkannte schnell, dass sämtliche der deformierten Frösche und Molche von einem parasitischen Saugwurm oder Trematoden befallen waren. Der Parasit bildet im Körper dieser Wirte Zysten, und zwar besonders oft nahe der Wurzel der Hinterbeine. Stanley vermutete, dass die Zysten mechanisch die normale Entwicklung störten.

Diese These prüfte er am Axolotl, einem Molch, und an Krallenfröschen. Beides sind bewährte Labortiere. Stanley pflanzte den Versuchstieren einfach winzige Glasperlen in die sich entwickelnden Beinknospen. Tatsächlich wuchsen beiden Amphibien nun zusätzliche Beine. Auch sonst wirkten die Missbildungen ganz so wie bei den beiden zystenverseuchten Arten aus dem Freiland.

Trotzdem bewies dies noch nicht den vermuteten Zusammenhang, denn weder vom Axolotl noch von Krallenfröschen sind solche Fehlbildungen aus der Natur bekannt. Klarheit brachten erst Forschungen, die einer von uns (Johnson) und Mitarbeiter seit Mitte der 1990er Jahre durchführten, als sich das Ausmaß der Froschmissbildungen abzuzeichnen begann. Johnson stieß bei seinen Recherchen auf die Arbeiten von Ruth und Sessions. Als er und seine Kollegen daraufhin zahlreiche kalifornische Feuchtgebiete überprüften, konnten sie zeigen, dass Teiche, in denen viele Königslaubfrösche mit überzähligen Gliedmaßen lebten, auch auffallend dicht von einer Wasserschnecke besiedelt waren. Es handelte sich um die Schneckenart *Planorbella tenuis*. Sie dient als Zwischenwirt für den Saugwurm *Ribeiroia ondatrae*, der den Forschern schon in den 1980er Jahren aufgefallen war (siehe Kasten Seite 62).

Nun sammelten Johnson und sein Team aus den schneckenreichen Gewässern missgestaltete Frösche und untersuchten sie. Alle diese Tiere steckten rund um den Ansatz der Hinterbeine gleich unter der Haut voller Zysten mit den Parasiten.

Den letzten Beweis brachten Laborstudien. Königslaubfrösche, die dem Saugwurm ausgesetzt wurden, entwickelten wie erwartet das gleiche Spektrum an Missbildungen wie im Freiland. Vor allem traten auch verschiedenste Fehlentwicklungen der Gliedmaßen auf. Teils fehlten den Fröschen Beine, teils hatten sie zu viele. Je stärker der Parasitenbefall, umso mehr Schäden wiesen die Tiere auf. Parasitenfreie Frösche wuchsen dagegen normal heran.

Schlaraffenland für einen Saugwurm

Diese Studie bedeutete den Durchbruch. Die weiteren Forschungen konnten darauf aufbauen. In der Folge erwies sich immer wieder, dass der Saugwurm *Ribeiroia* oft wesentlich beteiligt ist, wenn Amphibien zu viele oder zu wenige Beine wachsen. Wir selbst zeigten das für Nordkröten. Andere Forscher belegten den Zusammenhang kürzlich für Waldfrösche und für Leopardfrösche, andere nordamerikanische Arten.

Für die Parasitenthese spricht auch, dass nur manche der Gewässer voller verunstalteter Amphibien chemische Belastungen aufweisen, jedoch fast immer den ▷

▷ Saugwurm beherbergen. Außerdem deutet vieles darauf hin, dass die Parasitenplage in den letzten Jahren stark zugenommen hat. Sie könnte schon epidemische Ausmaße erreichen. Für die Zeit vor 1990 fanden wir nur sieben dokumentierte Fälle, die vermuten lassen, dass die Missbildungen und der Saugwurmbefall zusammentrafen.

Dagegen konnten wir in einer 2002 veröffentlichten Feldstudie auf 25 solche Habitate allein im Westen der USA hinweisen. Dort zeigten sechs verschiedene Amphibienarten körperliche Fehler. Der Befall variierte in den Habitaten zwischen fünf und neunzig Prozent der Individuen. In den letzten beiden Jahren fanden andere Forscher das gleiche Bild in mehreren US-Staaten des Ostens und mittleren Westens. Auch der Teich in Minnesota, der 1995 in die Schlagzeilen geriet, war mit dem Saugwurm verseucht.

Zum Teil mag die Zunahme auf die gestiegene Aufmerksamkeit von Wissenschaftlern und Öffentlichkeit zurückgehen. Aber in der Mehrzahl kam die erste Meldung von Leuten, die eigentlich nur ein paar Frösche fangen wollten. Oft waren das sogar Kinder.

Der komplizierte Lebenszyklus des Saugwurms *Ribeiroia* hilft verstehen, wieso die Frösche eines befallenen Gewässers oft Jahr für Jahr, Generation um Generation, missgebildet sind und sich der Befall schnell stark ausweiten kann (siehe Schema unten). Außer dem geschlechtsreifen Parasiten, der große Mengen Eier erzeugt, erscheinen in jedem Zyklus mehrere Larvenstadien, die auseinander hervorgehen, wobei sich die Larven jedes Mal noch selbst

Der vertrackte Vermehrungszyklus des Saugwurms *Ribeiroia*

Wenn Larven des Saugwurms – oder Trematoden – *Ribeiroia ondatrae* Kaulquappen befallen und sich in ihnen als Zysten einnisten, kann dies beim Wirtstier an den betreffenden Stellen schwere Fehlentwicklungen verursachen.

Dass sich der Schmarotzer unter günstigen Umständen in einem Gewässer epidemisch ausbreiten kann, verdankt er seiner Vermehrungsweise (Kreise und Pfeile): Er macht mehrere Larvenstadien durch, die in verschiedenen so genannten Zwischenwirten leben. Diese Larven können sich ihrerseits stark vermehren, bis in Vögeln, den Endwirten, wieder Eier produzierende geschlechtsreife Tiere entstehen.

Die erste Larvensorte (1) infiziert Wasserschnecken. Sie bringt dann eine zweite Form hervor, die sich unter Umständen nochmals vermehrt, Amphibienlarven befällt (2) und bevorzugt in der Nähe von deren Beinknospen Zysten ausbildet (3). Dabei handelt es sich um ein Ruhestadium, aus dem später im Endwirt das geschlechtsreife Tier hervorgeht. Vielfach wachsen der befallenen Kaulquappe dann zu viele Beine.

Der behinderte Frosch wird zu einer leichten Beute für den Endwirt des Parasiten, oft einen Reiher (4). Im Vogel reift der Schmarotzer heran und pflanzt sich sexuell fort (5). Seine Eier gelangen mit dem Vogelkot ins Wasser. Wenn die Larven schlüpfen (6), beginnt der Zyklus aufs Neue.

Der Mensch fördert den Schmarotzer, wenn er durch Eintrag von Nährstoffen in ein Gewässer Algenblüten erzeugt und dadurch der Vermehrung von Wasserschnecken Vorschub leistet. Intensive Ultraviolettstrahlung oder Pestizide – die ihrerseits Missbildungen bedingen können – machen die Amphibienlarven vermutlich für den Parasiten noch anfälliger.

STEVEN HOLT, STOCKPIX.COM

STEVEN HOLT, STOCKPIX.COM

Missbildungen wie beim linken Pazifik-Laubfrosch hängen meistens mit Saugwürmern zusammen, deren Zysten sich an der Beinwurzel einnisten. Das rechte Tier ist blind. Augenschäden rühren oft von starker UV-Strahlung her.

stark vermehren. Diese Larvenformen befallen verschiedene Wirte, in dem Fall Wasserschnecken und Kaulquappen. Die geschlechtsreifen Würmer leben in Vögeln, die im Wasser unter anderem Frösche fischen. Oft sind dies Reiher. Mit dem Vogelkot gelangen die Parasiteneier ins Wasser. Die daraus schlüpfenden Larven befallen Schnecken. In den Schnecken entstehen andere Larven, die freikommen, schließlich in Kaulquappen eindringen und in ihnen Zysten bilden. Wenn den Kaulquappen dann zu viele oder zu wenige Beine wachsen, werden die missgebildeten Frösche leicht Beute ihrer Fressfeinde. Der mitgefressene Parasit entwickelt sich im Reiher zum geschlechtsreifen Tier – der Zyklus beginnt von vorn.

Noch eine menschenverursachte Seuche

Doch wie konnte sich das Phänomen anscheinend zu einer regelrechten Epidemie ausweiten? Verschuldet auch dies letztlich der Mensch – dadurch, dass er in diese Lebensräume eingreift? Es gibt eine Reihe von Beispielen für Infektionskrankheiten, die neu aufgetreten sind oder zugenommen haben, weil eine veränderte Umwelt die Vermehrung eines Erregers begünstigte. Das gilt für menschliche Krankheiten wie für Tierseuchen – auch manche in Wildpopulationen. Solche Eingriffe können ganz verschiedener Art sein.

Beispielsweise tritt in den nordöstlichen USA nach den Wiederaufforstungen Lyme-Borreliose auf. Der Hintergrund: Die Weißwedelhirsche haben sich vermehrt. Sie sind Wirte von Zecken, die das Lyme-Bakterium übertragen. In Afrika nehmen Fälle von Bilharziose beim Menschen durch Stauseen, Fischteiche und künstliche Bewässerungssysteme zu. Diese weltweit verbreitete Tropenkrankheit verursacht ein anderer Saugwurm, der im Wasser durch die menschliche Haut eindringt. Er hat einen ähnlich komplizierten Lebenszyklus wie der beschriebene Amphibienparasit *Ribeiroia*. Auch die zunehmende Bedrohung durch verschiedene andere Krankheitserreger wie das Hanta- und das Ebolavirus hängt mit veränderten Umwelten zusammen. Selbst beim Aids-Erreger vermutet man einen solchen Hintergrund.

Auch für den Saugwurm *Ribeiroia* gelang uns jetzt der Nachweis, dass menschlicher Einfluss die Parasitenplage fördert. Wir untersuchten 59 Wasserstellen der westlichen USA, in denen mit diesem Schmarotzer infizierte, deformierte Frösche leben. Bei 44 dieser Gewässer handelt es sich um Tümpel auf Farmen, angelegte Weiher, Rückhaltebecken und Ähnliches. Vielfach herrscht dort eine Algenblüte, weil aus der Umgebung Dünger und tierische Ausscheidungen eingeschwemmt werden. Von den Algen ernähren sich Schnecken, die sich bei dem hohen Nahrungsangebot gut vermehren. Je mehr Schnecken die Saugwürmer befallen können, umso mehr vermehrt sich der Parasit und umso mehr Kaulquappen werden später von ihm heimgesucht. Auch der dritte Wirt des Parasitenzyklus, Reiher und andere Stelzvögel, finden sich an solchen nahrungsreichen Tümpeln gern ein.

Ein Befall mit Saugwürmern dürfte für einen Großteil der verunstalteten Amphibienvorkommen der wahrscheinlichste Auslöser sein. Dies ist aber gewiss nicht der einzige Hintergrund des Phänomens. Sicherlich verstärken weitere Umweltfaktoren oft noch das Erscheinungsbild. In manchen Fällen könnten bestimmte Gliedmaßen-, Haut- und Augenschäden sogar nur durch Wasserverschmutzung oder ultraviolette Strahlung verursacht sein. In anderen Fällen mögen diese beiden Faktoren die Immunkräfte der Amphibien so stark schwächen, dass sie einem Parasiten wenig entgegensetzen können. Möglich wäre auch, dass der Anteil verkrüppelter Amphibien ohne Beine noch dadurch steigt, dass in den betreffenden Gewässern Tiere überhand nehmen, die Kaulquappen angreifen, etwa Egel, Fische oder Wasserschildkröten.

Den Rückgang der Amphibien, durch welche Einflüsse auch immer, sollten wir als Warnung begreifen. Es erscheint dringend geboten, die einzelnen Ursachen für ihre Dezimierung zu entwirren und dann deren Wechselwirkungen aufzuzeigen. Die gleichen Eingriffe in die Natur könnten auch andere Tiere treffen, den Menschen nicht ausgenommen. ◁

Andrew R. Blaustein (oben) und **Pieter T. J. Johnson** forschen seit 1998 zusammen über Ursachen der Amphibienmissbildungen. Blaustein, Verhaltens- und Populationsökologe, ist Professor an der Oregon State University in Corvallis. Seit Jahren untersucht er die Hintergründe des weltweiten Amphibiensterbens. Johnson ist Doktorand am Center for Limnology der Universität Wisconsin in Madison.

Ecosystems, Evolution and UV Radiation. Von Charles S. Cockell und Andrew R. Blaustein (Hg.). Springer, 2001.

A Plague of Frogs. Von William Souder. Hyperion Press, 2000.

The Effect of Trematode Infection on Amphibian Limb Development and Survivorship. Von P. T. J. Johnson et al. in: Science, Bd. 284, S. 802, 30. April 1999.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Wetterbeobachtung mit Radar

Von Dirk Meetschen

Wer den Wetterbericht im Fernsehen aufmerksam verfolgt, kennt die bunten Bilder der Niederschlagsverteilung über Deutschland. Ihnen liegen die Daten eines ungewöhnlichen Messgeräts zu Grunde: des Wetterradars. Wie seine Verwandten in Luft- und Schifffahrt sendet es in kurzen Abständen Pulse elektromagnetischer Strahlung aus und empfängt die von Objekten zurückgeworfenen Signale (Radar: *radio detection and ranging*). Aus der Zeit, die ein Puls unterwegs war, lässt sich die Entfernung zum Objekt berechnen.

Das Besondere an diesem System sind die Objekte: Regentropfen. Damit sie die Pulse ausreichend reflektieren, arbeitet ein Wetterradar mit kleineren Wellenlängen als seine Verwandten etwa in der Luftfahrt. Zu klein dürfen sie allerdings nicht sein, da die Wellen sonst von Wolkentröpfchen zu stark gedämpft würden. Die Wahl fiel deshalb auf die so genannten X-, C- und S-Bänder mit Wellenlängen zwischen 2,5 und 15 Zentimetern.

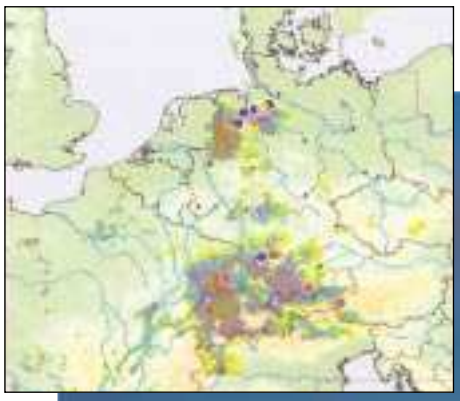
Mit dem Wetterradar lässt sich die räumliche Verteilung der Niederschlagsmenge in einem Umkreis von etwa hundert Kilometern gut aufgelöst erfassen. Grenzen setzt unter anderem die Erdkrümmung: Ein waagerecht ausgesandter Strahl entfernt sich mehr und mehr von der Erdoberfläche, sodass er zwangsläufig irgendwann über jeden Niederschlag hinwegschaut. Schon ein im Winkel von einem halben Grad ausgesandter Strahl tastet in hundert Kilometer Entfernung den Bereich zwischen 800 und 2700 Meter Höhe ab – im Winter kann dort leichter Schneefall herrschen, der Regen fällt weiter unten. Hinzu kommt, dass Eisteilchen bei gleichem Wassergehalt deutlich weniger reflektieren als flüssige Regentropfen, Mischteilchen aus Eis und Wasser dagegen überproportional stark. Es wäre deshalb wichtig zu wissen, ob unter-, inner- und oberhalb der Schmelzschicht gemessen wurde, in der Schnee und Graupel zu Regen werden. Ein weiteres Problem sind Berge und Gebäude in der Umgebung des Geräts, da sie starke »Echos« geben und alles hinter ihnen Liegende abschatten.

Um die Messdaten zu eichen, messen Stationen am Boden die Niederschlagsmenge mit so genannten Regenwippen: Die obere Seite der Wippe läuft voll, bis sie umschlägt und dabei einen elektrischen Impuls auslöst. Hat man die Daten eines Radars so gut wie möglich aufbereitet, kann man sie mit denen anderer Standorte – in Deutschland betreibt der Deutsche Wetterdienst insgesamt 16 – zu einem Komposit vereinen.

Meteorologen versuchen aus den aktuellen Radarmessungen den Niederschlag kurzfristig vorherzusagen. Im einfachsten Fall extrapoliert man dazu die Zugbahnen der einzelnen Niederschlagszellen und berücksichtigt gegebenenfalls noch die zeitliche Entwicklung ihrer Intensität. Doch im besten Fall lässt sich der Niederschlag auf diese Weise eine Stunde vorhersagen, im ungünstigsten Fall gar nicht. Deshalb sollen die Daten direkt in Wettervorhersagemodelle eingehen, die auf physikalischen Gesetzen des Wettergeschehens beruhen. Sowohl die Modelle als auch die Computer, auf denen sie laufen, setzen dem Vorhaben Grenzen. ◁

Der Diplom-Meteorologe **Dirk Meetschen** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Meteorologischen Institut der Universität Bonn.

Der Radarverbund des Deutschen Wetterdienstes (DWD) besteht aus 16 Radargeräten, die alle im C-Band (5,3 cm Wellenlänge) arbeiten. Jedes erfasst alle 15 Minuten nacheinander 18 kegelförmige Messvolumina unterschiedlicher Elevationswinkel und dazwischen alle 5 Minuten die bodennächste Schicht. Aus den Daten aller 16 Geräte werden Niederschlagskarten für das Bundesgebiet wie die abgebildete berechnet (Regenmenge von blau nach gelb abnehmend).



T RWTTR T W R T

Die Parabolantenne eines Wetterradars wird von zwei Motoren bewegt. Einer dreht sie um die Vertikalachse in der so genannten Elevation, der andere um die Horizontalachse im Azimut. Eine Hornantenne speist Mikrowellen in den Parabolspiegel, der die Strahlung bündelt und aussendet. Auf dem umgekehrten Weg empfängt die Antenne rückgestreute Pulse.

t pische R eich eite 1 20 ilo eter

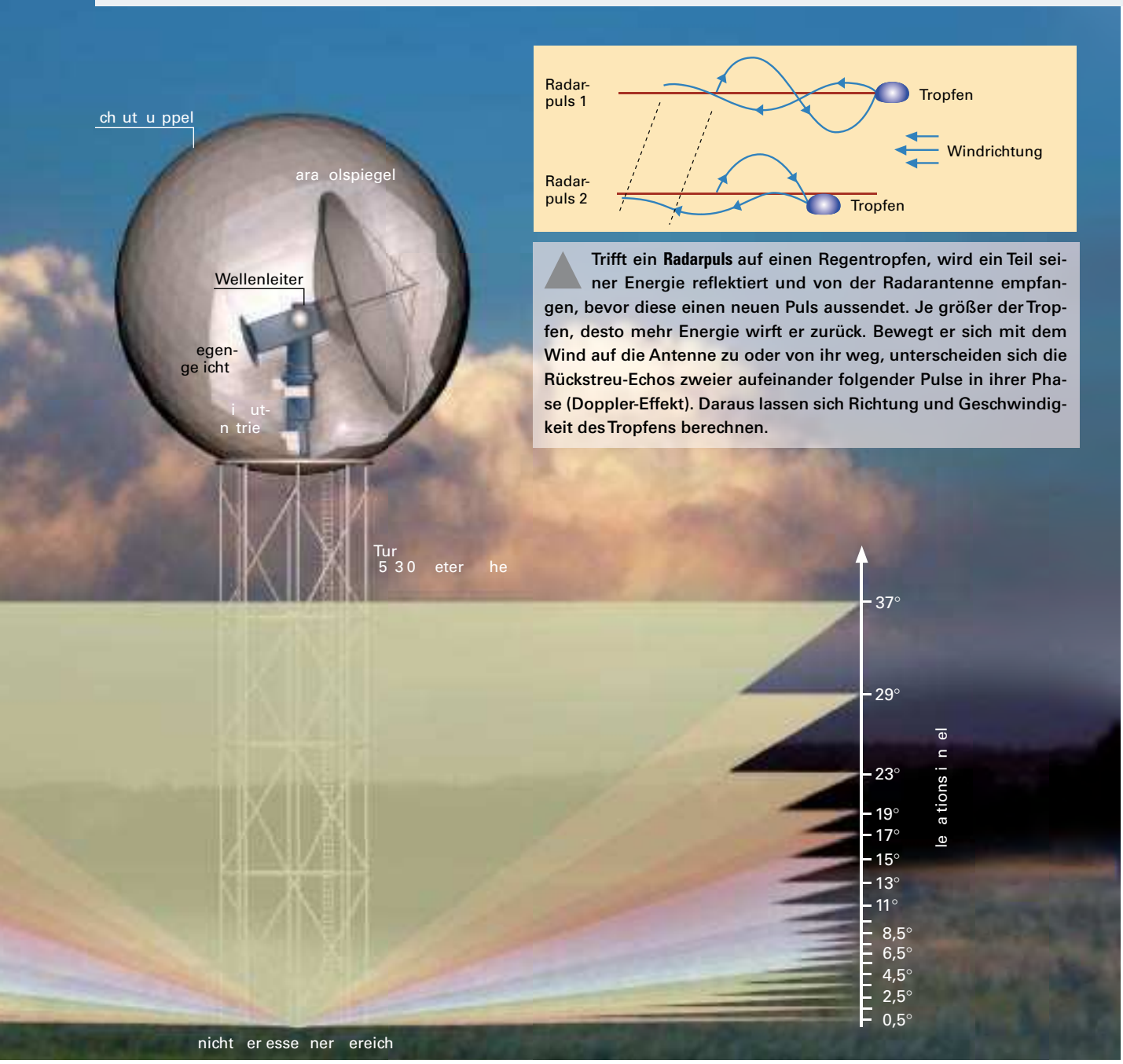
WUSSTEN SIE SCHON?

▶ Um **Hagel und Regen** zu unterscheiden, senden und empfangen Forschungsradare horizontal und vertikal polarisierte Mikrowellen. Da Regentropfen eine gleichmäßige, unten abgeplattete Form haben und während des Falls wenig taumeln, reflektieren sie erstere Strahlung stärker.

▶ Radargeräte erforschen auch die **Feinstruktur von Wolken**. Sie arbeiten mit geringeren Wellenlängen als ein Niederschlagsradar, damit die Pulse von den winzigen Wolkentröpfchen (Durchmesser weniger als ein Millimeter) reflektiert werden. Weil diese Wellen sehr stark gedämpft werden, »blicken« diese Geräte meist senkrecht nach oben und vermessen vertikale Wolkenprofile.

▶ Auch die Betreiber von **Talsperren und Stadtentwässerungssystemen** wollen Radardaten nutzen, um zeitiger auf Starkniederschläge reagieren zu können. In Pilotprojekten gehen solche Daten direkt in hydrologische Abflussmodelle ein, die dann vor anschwellenden Flüssen oder überlaufenden Staubecken warnen.

▶ Ein so genanntes **Lidar** *(light detection and ranging)* schickt gepulste Laserstrahlen senkrecht oder leicht geneigt von unten in die Atmosphäre und misst wie ein Radar die Reflexionen und deren Laufzeiten. Aus diesem Signal kann man vor allem die Unterkante der untersten Wolkenschicht bestimmen.



Trifft ein Radarpuls auf einen Regentropfen, wird ein Teil seiner Energie reflektiert und von der Radarantenne empfangen, bevor diese einen neuen Puls aussendet. Je größer der Tropfen, desto mehr Energie wirft er zurück. Bewegt er sich mit dem Wind auf die Antenne zu oder von ihr weg, unterscheiden sich die Rückstreu-Echos zweier aufeinander folgender Pulse in ihrer Phase (Doppler-Effekt). Daraus lassen sich Richtung und Geschwindigkeit des Tropfens berechnen.

Satelliten-gelenkte Waffen

Extrem treffsichere und zugleich kostengünstige Angriffsflugkörper sind die jüngste Errungenschaft im Rüstungsarsenal der USA. In Afghanistan haben sie ihre erste Bewährungsprobe bestanden.

Von Michael Puttré

Ein kalter Abend im November 2001 in Afghanistan. Sondereinsatzkräfte der US-Streitkräfte und tausend Anti-Taliban-Kämpfer rücken auf den Flughafen von Kandahar vor. Tom Lawhead, Oberstleutnant der US-Luftwaffe, beobachtet die Lage aus dem Cockpit seines F-16-Kampfbombers. Selbst mit seinen Nachtsichtgläsern kann der Kommandant des 389. Expeditions-Kampfgeschwaders kaum ausmachen, ob die Streitkräfte 4500 Meter unter ihm ihrem Vorhaben näher kommen, die Hauptverkehrsader der Stadt in Richtung pakistanische Grenze zu sperren. Außerdem hat einer von Lawheads Staffelführern in der Luft einen Konvoi beobachtet, der sich hinter einer nahe gelegenen Hügelkette bewegt. Es könnte sich um einen zurückkehrenden Spähtrupp handeln, den die Anti-Taliban-Kämpfer vorausgeschickt und zu dem sie den Funkkontakt verloren haben – oder um einen Hinterhalt des Feindes.

Die Frage klärt sich überraschend schnell. Kaum haben die Fahrzeuge des Konvois den Hügelkamm überschritten, gehen die Lichter aus, und eine raketengetriebene Granate wird abgeschossen. Taliban-Truppen führen einen Gegenangriff, und es kommt zu einem heftigen Schusswechsel.

Der leitende Luftaufklärer der Sondereinsatztruppe hat alle Mühe, herauszufinden, »wo die Guten aufhören und die Bösen anfangen«, so Lawhead später. Immerhin sind es nur 200 bis 300 Meter Abstand zwischen den Gegnern. Die Kampfbomberpiloten warten und beobachten die Schießerei aus fast fünf Kilometern Höhe. Schließlich gibt der leitende Luftaufklärer ihnen die Koordinaten der ersten Bombenziele durch. Die F-16 gehen in den Sturzflug und werfen Präzisionsgeschosse ab, die den feindlichen Konvoi auf der Stelle zerstören. »An diesem Überraschungsangriff hätte unser Plan, das südliche Afghanistan zu erobern, scheitern können«, berichtet der Geschwaderführer.

Dieser Präzisionsschlag in der Dunkelheit war nur möglich durch eine neue, extrem zielgenaue Waffentechnik. Die Flugzeuge waren nicht mit herkömmlichen, »dummen« Bomben bestückt, sondern mit den neuesten »intelligenten«, gleichwohl kostengünstigen Flugkörpern. Die Koordinaten, die der leitende Luftaufklärer an die F-16-Piloten gefunkt hatte, bezogen sich auf das Global Positioning System (GPS), jenes Netz von Satelliten, deren Funksignale jeden Ort auf der Erde mit großer Genauigkeit zu bestimmen erlauben. Die Kampffliegerbesatzung speiste die Zahlenreihen in ihre Feuerleitcomputer ein, die sie wiederum an die Mikrocomputer in den Waffen weiterreichten. Nach dem Abwurf steuerte jede Bombe mit Hilfe ihres eingebauten Trägheits-Navigations-Systems (*inertial navigation system*, INS) und der vom GPS gelieferten Positionsdaten den Zielpunkt so genau an, dass die Abweichung in der Hälfte der Fälle weniger als 25 Meter betrug.

GPS-gelenkte Waffen wurden erstmals in Afghanistan auch zur Unterstützung von Bodentruppen abgefeuert. Bereits während der Kosovo-Intervention 1999 setzten die USA eine begrenzte Zahl dieser Waffen ein, ebenso später für Luftangriffe auf irakische Luftabwehrstellungen in der nördlichen und südlichen Flugverbotszone. Aber erst unter den über Afghanistan abgeworfenen Bomben war die große Mehrheit satellitengesteuert. Während eines Irak-Krieges würde, so die Planer des Pentagon, eine weitaus größere Anzahl dieser intelligenten Waffen eingesetzt.

Anders als die Lenkbomben der letzten Generation, die durch einen Laserstrahl oder mit Hilfe einer eingebauten Kamera ins Ziel geführt werden, erfordert eine ▷

IN KÜRZE: GPS-UNTERSTÜTZTE WAFFEN

Das Pentagon hat eine Familie »intelligenter« **Luft-Boden-Raketen** eingekauft, deren eingebautes Trägheitsnavigationssystem durch Orientierung an den Satellitensignalen des **Global Positioning System (GPS)** in seiner Präzision erhöht wird. Sie dienen zum zielgenauen Angriff auf feindliche Truppen und Feuerstellungen aus der Ferne. Die GPS-Unterstützung verschafft den Waffen eine Präzision im Meterbereich: Der Abstand zwischen angestrebtem Ziel und Einschlagspunkt liegt in der Hälfte der Fälle unter 25 Meter.

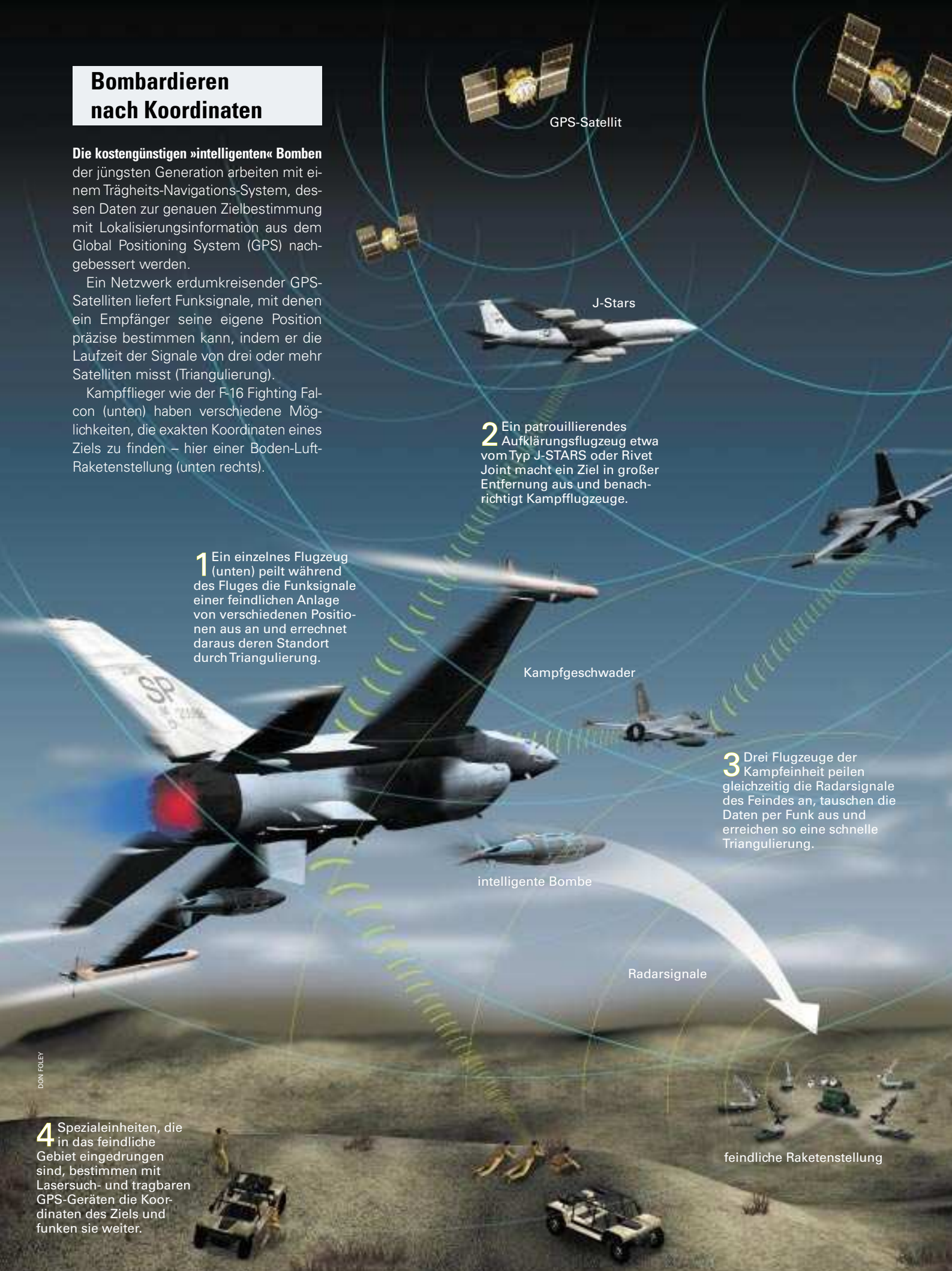
Dank der relativ niedrigen Kosten sind die USA in der Lage, diese Waffen in großer Zahl gegen feindliche Streitkräfte einzusetzen. Flugzeuge können ein gefährliches Ziel aus sicherer Entfernung angreifen. Im Vergleich zu **konventionellen Waffen** sind für ein gegebenes Einsatzziel weniger Kampfeinsätze erforderlich, und unbeabsichtigte Schäden an Leben und Eigentum von Zivilisten – so genannte **Kollateralschäden** – werden erheblich vermindert.

Bombardieren nach Koordinaten

Die kostengünstigen »intelligenten« Bomben der jüngsten Generation arbeiten mit einem Trägheits-Navigations-System, dessen Daten zur genauen Zielbestimmung mit Lokalisierungsinformation aus dem Global Positioning System (GPS) nachgebessert werden.

Ein Netzwerk erdumkreisender GPS-Satelliten liefert Funksignale, mit denen ein Empfänger seine eigene Position präzise bestimmen kann, indem er die Laufzeit der Signale von drei oder mehr Satelliten misst (Triangulierung).

Kampfflieger wie der F-16 Fighting Falcon (unten) haben verschiedene Möglichkeiten, die exakten Koordinaten eines Ziels zu finden – hier einer Boden-Luft-Raketenstellung (unten rechts).



DON FOLEY

GASTKOMMENTAR

Der Mythos vom sauberen Krieg

Das Thema Waffentechnik in einer wissenschaftlichen Zeitschrift mag erschrecken – aber Fragen über Krieg und Frieden, die einen technisch-wissenschaftlichen Hintergrund haben, sollten auch von der *scientific community* diskutiert werden, denn Technologien werden genutzt, um Kriege wieder führbar zu machen. Die These von der »Revolution in Military Affairs«, nach der es aufgrund überlegener Waffentechnik möglich ist, jeden Krieg zu gewinnen, wird in Fachkreisen diskutiert. Die Ergebnisse dieser Debatte beeinflussen die Rüstungshaushalte, die Abrüstung und die Kriege der Zukunft.

Gegen die Debatte selbst ist nichts einzuwenden. Doch wird sie auch fair und rational geführt?

Im vorliegenden Artikel preist Michael Puttré stolz die »Familie« der GPS-gelenkten Geschosse an, die heute in großer Zahl produziert werden. Diese Präzisionsbomben mögen durchaus über die ihnen attestierten Qualitäten verfügen. Dennoch zeichnet Puttré nur ein höchst eigenwilliges und verfälschendes Bild vom heutigen Krieg.

Artikel wie dieser verstärken Mythen und tragen nicht zum Verständnis moderner Kriege bei.

Mythos Nr. 1: Präzisionsgelenkte Waffen zerstören Punktziele

Puttrés Tabelle listet auch Waffen auf, die zur Flächenbombardierung dienen, zum Beispiel die »Wind Corrected Munition Dispensers« CBU-103 bis 105. Die Streubombe CBU-87 besteht aus 202 »Bomblets«, die jeweils 300 Splitter in einem Umkreis von 150 Meter gegen »soft targets«, also Menschen, verteilen. Ein einziger Behälter deckt eine Fläche von bis zu zwanzig Fußballfeldern ab. Interessant wäre es zu erfahren, wann, in welcher Menge und gegen wen diese Munition eingesetzt wurde. Da Militärs sich am Boden besser schützen können, dürften die meisten Opfer Zivilisten sein. In der Regel detonieren fünf bis zehn Prozent der Bomblets nicht und bleiben als Blindgänger noch lange Zeit nach Beendigung des Kampfes eine große Gefahr.

Mythos Nr. 2: Punktgenaue Munition richtet sich gegen militärische Ziele

»Intelligente« Präzisionswaffen können ebenso effizient zivile Ziele zerstören. Zwei präzisionsgelenkte Cruise Missiles trafen in Bagdad den Al-Ameriya-Bunker, in dem 400 Menschen Schutz gesucht hatten. Im Kosovo-Krieg wurden Busse, Züge und Wohnquartiere »punktgenau« bombardiert, in Afghanistan eine Hochzeitsgesellschaft ausgelöscht. Intelligent oder auch nicht sind nicht die Bomben, sondern diejenigen, die sie einsetzen – oder auch nicht.

Mythos Nr. 3: High-Tech-Waffen schonen die Zivilbevölkerung

Im Kosovo war die Präzisionsmunition zu ungenau für mobile Ziele, lediglich einige dutzend gepanzerte Ziele wurden getroffen. Als man militärische Ziele nicht fand, wurde zivile Infrastruktur in Jugoslawien bombardiert. Präzisionsbomben auf Raffinerien setzten in erheblichem Maße verschiedene Gifte frei (Spektrum der Wissenschaft 1/2000, S. 90). Die Folgen, kurz- wie langfristig, treffen hier die Zivilbevölkerung, die sich im Gegensatz zum Militär meist nicht schützen kann und an den Kampfzonen leben muss.

Mythos Nr. 4: High-Tech-Kriege sind »saubere« Kriege

Richtig ist, dass sich der Anteil der Präzisionsmunition in den vergangenen von den USA geführten Kriegen gesteigert hat. In allen Kriegen wurden aber auch völkerrechtswidrige oder humanitär zweifelhafte Mittel eingesetzt: Flächenbombardements, konventionelle Bomben im Tonnen-Bereich (Daisy-Cutter), Cluster-Bomben, vakuumerzeugende Bomben, Geschosse aus abgereichertem Uran mit radioaktiven und toxischen Wirkungen. Über die Folgen dieser High-Tech-Waffen wird nicht berichtet.

Die Anwendung von Hochtechnologie schont zuweilen auch Zivilisten, in erster Linie jedoch die eigenen Truppen.

Mythos Nr. 5: Krieg ist ein technisch lösbares Problem

Der moderne Krieg wird aus westlicher Sicht durch die meist in Kampfflugzeugen eingebauten Kameras vermittelt und erweckt den Anschein eines Computerspiels: Zielen, abdrücken, treffen und vernichten. Eine objektive Berichterstattung wird nicht zugelassen oder gar gesucht. Gegenstand der Berichte sind auch nicht die Kriegsopfer, sondern die Kriegsinstrumente. Noch nie wurde das moderne Schlachtfeld von so vielen Sensoren beobachtet, noch nie sah die Öffentlichkeit so wenig vom Ausmaß eines Krieges aus der Sicht der Betroffenen, und wenn die Waffen schweigen, schalten die TV-Kameras ab. Die heutige »technokratische« und mediale Vermittlung von Kriegen verdeckt, dass unschuldige Menschen sterben müssen. Krieg bleibt mörderisch, dreckig und unheilvoll, die »Geißel« der Menschheit, wie die UN-Charta es ausdrückt.

Die um sich greifende Argumentation vom »chirurgischen« modernen Krieg verdeckt zudem Konsequenzen und Alternativen. Auch moderne Waffen haben ihre Grenzen. Vor allem: Ein militärischer Sieg bedeutet noch nicht, dass man den Frieden gewonnen hat – siehe Afghanistan, Kosovo und Irak. Flüchtlinge, zerstörte Infrastruktur und fehlende Entwicklungsperspektiven sind die Folge.

Der subtilste Effekt dieser Argumentation ist wohl, dass Kriege dieser Tage wieder wahrscheinlicher und führbar werden. Die Beschränkung auf technische Fragen leistet dem Glauben an den »sauberen Krieg« Vorschub und erklärt damit klammheimlich Kriege zur Normalität. Die Fragen nach der Legalität, nach Konfliktzusammenhängen und politischen Folgen von Kriegen werden unterdrückt. Kriegsverhütung, oberstes Ziel verantwortlicher Friedenspolitik, gerät durch nebenstehenden Artikel vollends in den Hintergrund.

Götz Neuneck

Der Autor ist promovierter Physiker und wissenschaftlicher Referent am Institut für Friedensforschung und Sicherheitspolitik der Universität Hamburg.

Der Stachel der Hornisse: Ein Kampfbomber der Marine vom Typ F/A-18 »Hornet« (»Hornisse«) patrouilliert am Himmel über Aghanistan. Er hat das gebräuchlichste der GPS-unterstützten Präzisionsgeschosse an Bord, die JDAM *(Joint Direct Attack Munition)*.

GPS-gesteuerte Waffe nicht, dass das Trägerflugzeug in der Nähe bleibt und das Ziel zur Orientierung ausleuchtet. Nach dem Abschuss steuert sie sich völlig autonom ins Ziel, was sie auch unter schlechten Wetterbedingungen treffsicher macht. Die neuesten Versionen dieser Waffen können die Informationen der modernen Infrarot- und Radar-Zielsuchsysteme verarbeiten, die auf amerikanischen Bombern installiert sind, und sind darüber hinaus direkt mit dem weltumspannenden Navigations- und Kommunikationsnetz des Landes verbunden. Damit können sie ihre GPS-Daten aus vielen verschiedenen Quellen abrufen. Dazu gehören insbesondere die Aufklärungssatelliten vom Typ KH-11 (optisch) und Lacrosse (Radar) sowie eine Vielzahl von Überwachungsflugzeugen: die immer noch nützlichen U-2, die mit Hochleistungskameras ausgestatteten E-8A »J-STARS« und RC-135 »Rivet Joint«, die robusten und zuverlässigen Patrouillenflugzeuge EP-3 »Aries« der Marine und RC-12 des Heeres, die weithin bekannten Awacs-Flugzeuge sowie die unbemannten Kleinflugzeuge »Predator« und »Global Hawk«, deren Angriffsfähigkeiten beständig erweitert werden (Grafik Seite 67).

Ein Jahrzehnt technischer Fortschritt

Wie jede technische Innovation erlauben auch die neuartigen Tötungsgeräte ihren Anwendern, ihre Ziele mit weitaus geringerem Aufwand an Material und Personal zu erreichen als zuvor. Außerdem kann ein Kampfflugzeug einen Angriff führen und dennoch außerhalb der Reichweite feindlicher Flugabwehrsysteme bleiben, was das Abschussrisiko erheblich vermindert. Drittens hilft die Präzision der Waffen, den Tod unbeteiligter Zivilisten und größere Sachschäden zu vermeiden, die mit den bisherigen Waffensystemen als Nebenwirkungen *(collateral damages)* in Kauf genommen wurden. Die größte Schwäche der neuen Technik besteht darin, dass sie durch geschickt eingesetzte Störsignale in die Irre geführt werden kann.

GPS-unterstützte Waffen erlauben eine Flexibilität im Kampf, die noch vor zehn Jahren kaum vorstellbar war. »Während des Golfkriegs kannten wir den Zielpunkt unseres Einsatzes im Allgemeinen schon lange vorher«, bemerkt Lawhead – eine Information, die dann auch nicht mehr aktualisiert werden konnte. Heute können die Einsatzleiter auf veränderte Bedingungen sehr viel schneller reagieren. »Die 389. Schwadron hat 178 Einsätze in Afghanistan geflogen. Nur ein einziges Mal haben wir tatsächlich das Ziel angegriffen, das vorab geplant war«, so Lawhead.

Die verbesserte Effektivität verändert auch die strategische Planung. Vor dem Golfkrieg von 1990/91 galt die Faustregel, dass sechs herkömmliche Bomben – die gesamte Ladung eines typischen Kampffliegers – erforderlich seien, um ein bestimmtes Ziel zu zerstören. Für ein ausgedehntes Ziel, das man vor zehn Jahren noch mit 20 bis 24 Kampfbombern angegriffen hätte, genügen mit den Präzisionswaffen zwei bis vier Jets.

Die neue Technik erlaubt es, die in großer Anzahl vorhandenen, vergleichsweise kostengünstigen Standardbomben der US-Luftwaffe mit »Intelligenz« auszustatten. Damit können sie auch gegen gut geschützte oder schwer zu erreichende Ziele eingesetzt werden, die bisher den teuren und nur in geringer Stückzahl vorhandenen Marschflugkörpern und Anti-Schiffs-Raketen wie Tomahawk und Harpoon vorbehalten waren.

Von den im Golfkrieg abgeschossenen Waffen waren nur etwa sechs Prozent präzisionsgesteuert – dem damaligen Stand der Technik entsprechend vor allem lasergesteuerte Geschosse, ferngelenkte Raketen und selbststeuernde Marschflugkörper. Das erst vor kurzem etablierte GPS wurde nur zu Navigationszwecken eingesetzt, aber noch nicht zur Lenkung von Waffen. Inzwischen hat sich das Verhältnis umgekehrt: Etwa neunzig Prozent der bis heute über Afghanistan abgeworfenen Bombenfracht war GPS-gelenkt.

Sieg über das Wetter

Kleinräumige Ziele, Bedenken wegen Kollateralschäden und die Möglichkeit, mit dem abwerfenden Flugzeug weit vom Schuss zu bleiben: Die Gründe für den Einsatz der neuen Waffen bestehen weiterhin, weswegen die Planer des US-Verteidigungsministeriums ihr Arsenal weiter aufstocken. Vor der Afghanistan-Kampagne besaß das Pentagon fast zehntausend JDAMs, die gebräuchlichste GPS-unterstützte Waffe (siehe Kasten Seite 70/71). Luftwaffe und Marine haben gemeinsam 230 000 Stück bestellt. Zurzeit baut der Flugzeughersteller Boeing etwa 1500 Systeme im Monat in einer Fabrik in St. Charles (US-Bundesstaat Montana); die Produktion soll bis August auf 2800 Stück pro Monat hochgefahren werden.

Vorgänger der GPS-Waffen sind die lasergelenkten Präzisionswaffen aus der Zeit des Vietnam-Krieges, die immer noch in Gebrauch sind. Diese älteren Systeme sind

GPS-unterstützte Waffenarsenale

Name	Hersteller	Typbezeichnung	Einsatzzweck	Ladung	Gesamtgewicht (in kg)
Joint Direct Attack Munition (JDAM) U.S. NAVY	Boeing	GBU-31(v)1	allgemeiner Einsatz	Geschoss MK 84	900
		GBU-31(v)38	gehärtete Ziele	Schlaggeschoss BLU-109	900
		GBU-32	allgemeiner Einsatz	Geschoss MK 83	450
		GBU-38	allgemeiner Einsatz	Geschoss MK 82	240
Wind Corrected Munitions Dispenser (WCMD) LOCKHEED MARTIN	Lockheed Martin	CBU-103	weiche, großflächige Ziele	Behälter CBU-87 mit 202 Mehrzweck-Bomblets BLU-97	450
		CBU-104	Flächenverminung	Behälter CBU-89 Gator mit 72 Panzerabwehrminen BLU-91 und 22 Antipersonenminen BLU-92	450
		CBU-105	Panzer und Fahrzeuge	Behälter CBU-97 mit 10 infrarotausgelösten Geschossen BLU-108	450
Joint Standoff Weapon (JSOW) RAYTHEON	Raytheon	AGM-154A (JSOW-A)	weiche, großflächige Ziele	145 Mehrzweck-Bomblets BLU-97	470
		AGM-154B (JSOW-B)	Panzer und Fahrzeuge	6 Infrarot-Geschosse BLU-108	470
		AGM-154C (JSOW-C)	gehärtete Ziele	ein einziger 240 Kilogramm schwerer Gefechtskopf	680
Joint Air-to-Surface Standoff Missile (JASSM) LOCKHEED MARTIN	Lockheed Martin	AGM-158	hochwertige, gehärtete Ziele	ein einziger 450 Kilogramm schwerer Gefechtskopf	1000

▷ mit einer Suchautomatik ausgestattet, die den Flugkörper auf vom Ziel reflektierte Laserstrahlung ausrichtet. Das Ziel muss also von einem Laser angestrahlt werden, und zwar vom angreifenden Flugzeug, von einem Begleitflugzeug oder von einem Beobachtungsposten am Boden aus. Solche Waffen sind nach wie vor wegen ihrer hohen Zielgenauigkeit hoch geschätzt. Aber eine dichte Wolkendecke, Rauch, Staub und andere Tarnungen machen sie wirkungslos. Die Analyse des Luftkrieges über dem Irak und Kuwait hat gezeigt, dass viele Angriffe unterlassen wurden, weil die Piloten die Ziele schlicht nicht sehen konnten.

Angesichts dieser Nachteile forderte 1991 der damalige Stabschef der Luftwaffe, Generalleutnant Merrill McPeak, eine autonome Waffe, die auch durch Wolken und andere Sichthindernisse hindurch ihren Weg ins Ziel finden würde. Das US-Verteidigungsministerium schrieb daraufhin einen Großauftrag für GPS-gestützte Waffen aus, die sowohl von der Luftwaffe als auch von der Marine verwendet werden sollten. Das innovative Konzept sollte billig, zielgenau und mit vorhandenen Waffen, Flugzeugträgersystemen und Infrastrukturen kompatibel sein. Da die technischen Anforderungen wenig Raum für verschiedene Lösungen ließen, wurden die Kosten zum entscheidenden Faktor. Aus der Ausschreibung ging 1995 Boeing als Sieger unter zwölf Anbietern hervor. Das Ergebnis war die »Joint Direct Attack Munition« (JDAM, siehe Kasten oben) in verschiedenen Varianten, die sich durch ihre Reichweite unterscheiden. Je nach der Gegenwehr, die ein angreifender Pilot fürchten muss, wird er sich dem Ziel mehr oder weniger nähern und die der Entfernung entsprechende JDAM abwerfen; dabei muss er in größerer Entfernung eine geringere Zielgenauigkeit in Kauf nehmen.

Diese Waffen erreichen ihre unübertroffene Präzision, indem sie ihre von einem eingebauten Computer, dem Autopiloten, berechnete Flugbahn mit verschiedenen, einander ergänzenden Mitteln korrigieren. Ein GPS-Empfänger ermittelt die Position des Geschosses durch Triangulierung mit Hilfe von Satellitensignalen (siehe Grafik Seite 67). Zusätzlich verfolgt ein Trägheitsmesssystem (*inertial measurement unit*, IMU) aus Beschleunigungssensoren, die an Kardanringen aufgehängt sind, die Flugbahn.

Der aktuelle Waffenkatalog

Die ersten 25 bis 30 Sekunden des freien Falls benötigt das Geschoss, um die GPS-Daten zu empfangen und zu verarbeiten. Die daraus errechneten Koordinaten korrigieren die vom IMU bestimmten Werte. Aus den so gewonnenen Daten der eigenen Position bestimmt der Autopilot die Einstellung der elektrisch gesteuerten Schwanzflossen. Sollten die GPS-Signale durch schlechten Empfang oder Störsender unbrauchbar sein, bleibt dem Geschoss immer noch das eingebaute Trägheitsnavigati-

Länge (in m)	Reichweite (in km)	Treffsicherheit (Streuradius in m)	geschätzter Stückpreis (in Dollar)	Indienst-stellung	Bemerkungen
3,90	24	13	20000 (Aufrüstbausatz) + 3000 (Bombe)	1998	Alle JDAM-Bausätze enthalten einen GPS-Empfänger.
3,80	24	13	20000 (Aufrüstbausatz) + 5000 (Geschoss)	1998	
3,05	24	13	20000 (Aufrüstbausatz) + 2000 (Geschoss)	1999	Die Version GBU-35 wird mit einem Gefechtskopf BLU-110 ausgestattet, der für Flugzeugträger stabilisiert wurde.
2,20	24	13	20000 (Aufrüstbausatz) + 1000 (Geschoss)	2004	für B-2 Spirit-Bomber, die bis zu 80 Geschosse tragen werden
2,33	11	26*	10000 (Aufrüstbausatz) + 14000 (Behälter mit Bomblets)	1999	Alle WCMDs beziehen ihre GPS-Daten vom abfeuernden Flugzeug.
2,33	11	26*	10000 (Aufrüstbausatz) + 40000 (Behälter samt Minen)	1999	
2,33	11	26*	10000 (Aufrüstbausatz) + 300000 (Behälter samt Geschossen)	1999	
4,06	≥64	15*	220 000	1999	Alle JSOWs sind Gleitgeschosse ohne eigenen Antrieb mit Reichweiten von 25 Kilometern aus geringer Höhe.
4,06	≥64	15*	375 000	2003	Das Programm wurde erheblich gekürzt.
4,06	≥64	3	400 000	2004	mit Infrarotkamera für die Schlussphase des Zielanflugs; eine düsengetriebene Version mit 200 Kilometer Reichweite ist in der Entwicklung.
4,26	≥300	3	700 000	2003	mit Infrarotkamera für die Schlussphase, Düsenantrieb und verbesserter Technik gegen Empfangsstörungen

* Munition mit großer Streuung für großflächige Ziele

onssystem, um die zuletzt aktualisierten Koordinaten fortzuschreiben.

Die JDAM-Systeme wurden 1998 in Dienst gestellt. Es handelt sich nicht um vollständige Waffen, sondern um einen Aufrüstbausatz, mit dem eine Standardbombe (mit einem Stückpreis von einigen tausend Dollar) in ein intelligentes GPS-Geschoss verwandelt wird. Die Kosten sind mit etwa 20 000 Dollar pro Bausatz vergleichsweise niedrig, wenn man bedenkt, dass ein einziger Marschflugkörper *(cruise missile)*, wie er im Golfkrieg eingesetzt wurde, eine Million Dollar kostet.

Die von den USA eingesetzten JDAMs haben eine Reichweite von etwa 12 bis 13 Kilometern, wenn sie in einer Höhe von etwa 6000 Metern abgefeuert werden. Der Rüstungshersteller MBDA entwickelt zur Zeit ein Gleitflug-Zusatzsystem namens Diamond Back, das die Reichweite eines JDAMs verdreifachen wird.

Der tödliche kleine Bruder von JDAM ist der Wind Corrected Munitions Dispenser (WCMD), der im Jahr 2000 von Lockheed Martin erstmals ausgeliefert wurde (Kasten oben). Es handelt sich ebenfalls um einen Aufrüstbausatz, allerdings für die so genannten Clusterbomben, die sich kurz vor dem Ziel in eine Schar kleinerer Bomben auflösen. Da sein Trägheitsnavigationssystem nicht durch einen GPS-Empfänger aufgebessert wird, hat er nur die halbe Reichweite eines JDAM.

Größer und komplexer dagegen ist die Joint Standoff Weapon (JSOW, siehe Kasten oben), die von Raytheon gebaut wird. Es handelt sich um eine Gleitbombe mit einem 250 Kilogramm schweren Sprengkopf und Flügeln, die sich während des Zielanfluges entfalten. Ihre maximale Reichweite liegt je nach Abschusshöhe bei 25 bis 65 Kilometern. Im Gegensatz zu den vorgenannten Waffen handelt es sich um ein vollständig neues System. Die Bezeichnung »standoff« (»bleib weg«) bedeutet, dass die Bombe aus sicherer Entfernung abgefeuert werden kann: Das angreifende Kampfflugzeug bleibt außerhalb der Reichweite üblicher Luftabwehrsysteme.

Konzipiert ist die JSOW als eine Art Universal-Transporter für tödliche Fracht aller Art. Die erste Variante, JSOW-A, wurde 1999 in Dienst gestellt und trägt Teilsysteme ähnlich den WCDMs. JSOW-B wird noch in diesem Jahr verfügbar sein und transportiert Panzerabwehrwaffen.

Bunkerbrecher

Die für 2005 geplante JSOW-C enthält einen einzigen Sprengkopf mit hoher Durchschlagskraft, der Bunker und andere befestigte Ziele zerstören soll. Über die Steuerung mittels Trägheitsnavigation und GPS hinaus wird die JSOW für die letzten Sekunden des Zielanfluges über eine Infrarotkamera verfügen. Der Bordcomputer vergleicht das Kamerabild mit einem abgespeicherten Bild des Ziels, das von einem Satelliten, einem Aufklärungsflugzeug oder einem unbemannten Flugkörper stammt, und korrigiert daraufhin die Flugbahn. ▷

RAYTHEON

Flächenzerstörung: Ein Typ der Joint Standoff Weapon (JSOW) besteht aus einer größeren Zahl von »Bomblets« (»Bömbchen«), die über ein größeres Zielgebiet ausgestreut werden und auf ihrer gemeinsamen Flugbahn so gut wie alles vernichten – Truppen, Fahrzeuge, nicht-verstärkte Gebäude und Feuerstellungen.

▷ Das größte, stärkste und technisch anspruchsvollste Mitglied dieser Waffenfamilie ist die Joint Air-to-Surface Standoff Missile (JASSM) von Lockheed Martin, die voraussichtlich im Laufe dieses Jahres in Dienst gestellt wird. Es handelt sich um einen düsengetriebenen Marschflugkörper mit einer Reichweite von etwa 300 Kilometern und dreifachem Zielfindungssystem (Trägheitsnavigation, GPS und Infrarotkamera) nach dem Vorbild der JSOW-C. Der 500 Kilogramm schwere Durchschlagssprengkopf ist für hochwertige und gut geschützte Ziele bestimmt.

Die fortgeschrittene Technik erlaubt es inzwischen auch, feindliche Stellen anhand der von ihnen selbst ausgesandten Signale zu lokalisieren und zu identifizieren, ohne selbst verräterische (Radar- oder andere) Strahlung auszusenden. Diese Richtungsbestimmungsverfahren sind inzwischen so genau, dass eine GPS-Waffe, mit den dadurch gewonnenen GPS-Koordinaten ausgestattet, das Ziel zuverlässig ansteuert und zerstört.

Dementsprechend zielt eine neue Doktrin der amerikanischen Streitkräfte darauf ab, aktives, auf angreifenden Flugzeugen angebrachtes Radar durch neuere, passive Sensoren zu ersetzen, die keine verräterischen Signale ausssenden. Diese Empfangsanlagen messen nicht nur die Richtung, aus der ein feindlicher Radarstrahl kommt, sondern auch die Dopplerverschiebung der Wellenlänge, die durch die Eigenbewegung des Trägerflugzeugs verursacht wird. Da dieses dank GPS und Trägheitsnavigation seine eigene Position genau kennt, kann ein spezielles Ortungsprogramm die Richtung der Radarquelle sehr genau bestimmen. Aus den Richtungsangaben von drei oder mehr Flugzeugen, die einander ihre Daten über einen Funkkanal übermitteln, ist auch die Position der Quelle sehr präzise zu ermitteln.

Diese Fähigkeit, über die zurzeit – zumindest aus größerer Entfernung – nur spezialisierte elektronische Aufklärungsflugkörper verfügen, soll als Standardausstattung in die taktischen Flugzeuge der nächsten Generation, die F-22 »Raptor« und die F-35 »Joint Strike Fighter«, eingebaut werden. Die F-22 soll im Jahr 2006 einsatzfähig sein und die F-35 wenige Jahre später.

Dieselben GPS-Signale, die den neuen Waffen ihre Zielsicherheit verleihen, sind zugleich ihre Achillesferse. Von der Sendeleistung eines GPS-Satelliten kommen gerade mal 10^{-16} Watt beim Empfänger auf der Erdoberfläche an, entsprechend der Leuchtkraft einer 25-Watt-Glühbirne aus 15 000 Kilometern Entfernung oder einem Milliardstel der Leistung, die eine Fernsehantenne empfängt. Derart schwache Signale zu stören ist relativ einfach; daher bauen die Waffenhersteller Schutzmechanismen in die Empfänger ein. So können die Mehrkanal-GPS-Empfänger selbst dann noch Signale von manchen Satelliten empfangen, wenn der Empfang aus einer bestimmten Richtung durch Störsender unmöglich gemacht wird. Mit speziellen Antennen und Signalverarbeitungsprogrammen lassen sich Störsignale weitgehend dämpfen oder aus dem Datenstrom herausrechnen.

Die Präzisionssysteme sind auch gegenüber menschlichem Versagen nicht immun. Im Oktober 2001 berichtete das Pentagon, ein Kampfbomber der US-Marine vom Typ F/A-18 »Hornet« habe sein Ziel mit einem GPS-gestützten Geschoss verfehlt. Das Flugzeug hatte eine JDAM auf ein Wohngebiet geworfen, etwa einen Kilometer vom Flughafen von Kabul entfernt. Mindestens vier Menschen starben, weitere wurden verletzt. Eine Untersuchung kam zu dem Ergebnis, es habe sich um einen »Fehler beim Zielfindungsprozess« gehandelt.

Bei einem weiteren Zwischenfall im Dezember 2001 kamen drei Amerikaner und fünf verbündete afghanische Soldaten ums Leben. Während eines Bombenangriffs war die Batterie in dem Empfänger eines Fluglotsen ausgewechselt worden. Durch die Unterbrechung der Energiezufuhr wurden die berechneten Zielkoordinaten durch die des eigenen Standorts ersetzt. Damit lenkte der Fluglotse eine JDAM, in die diese Koordinaten eingespeist wurden, im Effekt gegen sich selbst.

Störfeuer gegen Antistörfeuer

Es scheint, dass diese Fehler in erster Linie auf die Unerfahrenheit der Bedienungsmannschaften zurückzuführen sind; sie sollten sich folglich durch ein besseres Training und größere Einsatzerfahrungen vermeiden lassen. Letztendlich ist aber der Anteil der Fehlschüsse bei GPS-gestützten Waffen gering.

Die Berge des östlichen Afghanistan waren für die GPS-gestützten Geschosse eine harte Bewährungsprobe. Hier zeigten sich die Stärken der Technik – und ihre Grenzen. Oftmals wartete der Feind schlicht das Ende eines Dauerbombardements in gut geschützten Höhlen ab. Des weiteren muss sich noch erweisen, wie wirksam die Schutzvorkehrungen gegen Störsender sind, wenn die andere Seite sich erst auf die neue Technik eingestellt hat.

Insgesamt aber wächst unter den Planern des Pentagon dank der immer reichlicheren Vorräte an GPS-Waffen die Zuversicht, dass kleinere, leicht gerüstete Gruppen von Soldaten Siege auch über zahlenmäßig überlegene feindliche Truppen erringen können, wenn sie die Unterstützung einer zielsicheren Kampfkraft aus der Luft haben. ◁

Michael Puttré ist Chefredakteur der Monatszeitschrift JED *(The Journal of Electronic Defense)*, die sich mit Themen wie elektronische Kriegsführung, Aufklärung und Präzisionswaffen befasst. Er schreibt seit 15 Jahren über Militär- und Technologiethemen.

Air Warfare in the Missile Age. Von Lon O. Nordeen. Smithsonian Institution Press, 2002.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

AUTOR UND LITERATURHINWEIS

Jeder Versuch, andere am Verbessern von Dingen zu hindern, richtet sich gegen den Geist des Menschen

»Es ist unserer Aufmerksamkeit nicht entgangen, dass die spezifische Paarung, die wir postulieren, unmittelbar auf einen möglichen Kopiermechanismus für die Erbsubstanz verweist.« 25. April 1953

MIKE MEDICINE HORSE, HYBRID MEDICAL ANIMATION

Das Zitat gegen Ende der berühmten wissenschaftlichen Veröffentlichung von Francis C. Crick und James D. Watson spielt auf eine besondere Eigenart des DNA-Moleküls an: Zwei Stränge lagern sich paarweise aneinander, wobei der eine Strang sich zum anderen ungefähr wie Negativ und Positiv einer Fotografie verhält.

Diese Struktur hat neuartige Eigenschaften, die von beträchtlichem biologischem Interesse sind.« So lautet eine der berühmtesten Untertreibungen der Wissenschaftsgeschichte. Sie steht als zweiter Satz in der kurzen Mitteilung von James D. Watson und Francis H. C. Crick, die am 25. April 1953 in der Fachzeitschrift *Nature* erschien. Darin schlugen die beiden Forscher für die Erbsubstanz DNA *(deoxyribonucleic acid)* eine Doppelhelix-Struktur vor: zwei schraubig umeinander gewundene Molekülstränge, die eine Art Reißverschluss-System zusammenhält. Diese bahnbrechende Idee machte erst unsere heutigen molekularbiologischen und genetischen Erkenntnisse möglich.

Zum 50. Jahrestag dieses Ereignisses sprach John Rennie, Chefredakteur von Scientific American, mit Watson. Die Unterhaltung fand im Arbeitszimmer des Genetikers am Cold Spring Harbor Laboratory auf Long Island statt, dem er seit 1968 zunächst als Direktor, dann als Präsident vorsteht.

John Rennie: Die DNA hat sich von einem bloßen wissenschaftlichen Objekt zu einem gewaltigen Kulturphänomen entwickelt, zur Metapher für unsere ganze Natur. Sie taucht in der Alltagssprache auf und sogar in der Kunst. Hätten Sie damals, als Sie am Modell der Doppelhelix arbeiteten, der DNA je einen so großen Bekanntheitsgrad prophezeit?

James Watson: Aber nein, das konnten wir nicht. Schließlich hatte damals noch niemand DNA sequenziert oder künstlich vermehrt.

Der berühmte australische Immunologe [Frank Macfarlane] Burnet schrieb Anfang 1960 in einer medizinischen Fachzeitschrift, DNA und Molekularbiologie würden keine Auswirkungen auf die Medizin haben, denn das sei nur möglich, wenn

man die DNA lesen könne. Eben deshalb ist dann das Human-Genomprojekt so wichtig gewesen.

Damals, 1953, wollten wir nur herausfinden, wie die DNA ihre Informationen liefert und wie der zelleigene Apparat zur Proteinherstellung aussieht. Sonst nichts; an Gentherapie haben wir noch nicht gedacht. Die Idee keimte erst 15 Jahre später auf – um 1968 herum, als enzymatische Schneidewerkzeuge für die DNA aufkamen und es bald mit der DNA-Sequenzierung losging.

Rennie: Sie haben einmal gesagt, Sie hätten sich anfangs mit DNA-Forschung beschäftigt, weil Sie sich für Evolution und Information interessierten.

Watson: [Der Physiker Erwin] Schrödinger war vermutlich nicht der Erste, der meinte, dass es irgendeinen Code geben muss, damit die Moleküle in den Zellen eine Information tragen können, aber bei ihm habe ich es zum ersten Mal gelesen. Als sein Buch [Was ist Leben? 1944 auf Englisch] erschien, stellten ein paar Leute eine solche Verbindung zwischen Genen und Proteinen her, beispielsweise [der Biologe J. B. S.] Haldane. Zu jener Zeit hatte man noch bei keinem einzigen Protein die Abfolge der Aminosäuren aufgeklärt. Man wusste zwar, es gibt eine Sequenz, aber das war auch schon alles. Erst als wir die DNA-Struktur hatten und [der Chemiker und spätere zweifache Nobelpreisträger Frederick] Sanger die erste Aminosäuresequenz, kam frischer Wind in die Sache.

Rennie: Würden Sie also sagen, dass das Motiv für Ihre Arbeit weniger bloßer Ehrgeiz war als vielmehr die Faszination, die von dieser Idee ausging?

Watson: Ich bin von Natur aus neugierig. Ich las beispielsweise lieber etwas über Wirtschaftsgeschichte als über reine Geschichte, weil ich auf Erklärungen aus war. Und eine Erklärung für das Leben musste in seinen molekularen Grundlagen liegen. Ich habe nie geglaubt, dass die Grundlage des Lebens spiritueller Natur ist; ich hatte das Glück, bei einem Vater groß zu werden, der keine religiösen Überzeugungen besaß. Solche Fesseln banden mich nie. Meine Mutter war getaufte Katholikin, aber das war's dann auch.

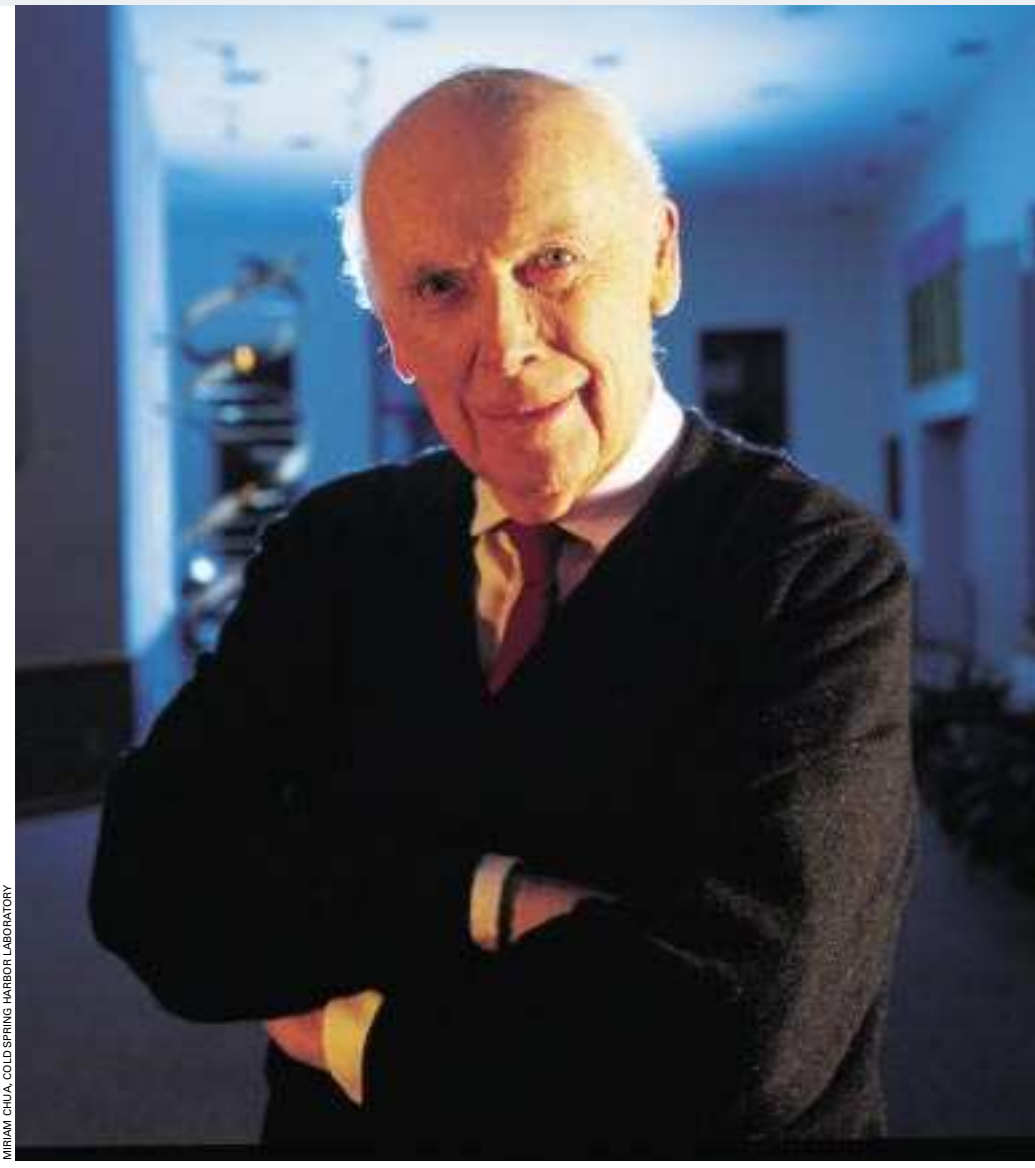
Rennie: Wenn man heute auf den Wettlauf um die Doppelhelix zurückblickt, dann lag die Entdeckung irgendwie schon in der Luft. Viele waren ganz nahe dran: Sie und Crick, Linus Pauling vom California Institute of Technology, Maurice Wilkins und Rosalind Franklin vom King's College. Hätten Sie und Crick die Entdeckung nicht zu diesem Zeitpunkt gemacht …

Watson: … Ich glaube, es hätte nicht einmal mehr ein Jahr gedauert.

Rennie: Es gab immer Diskussionen um die Frage, ob Wilkins Ihnen Rosalind Franklins Röntgenstrukturaufnahmen ohne ihre Einwilligung gezeigt und Ihnen wie Crick damit einen wichtigen Anhaltspunkt für die DNA-Struktur geliefert habe. Wäre es im Rückblick nicht gerechter gewesen, wenn Franklin anstelle von Wilkins zusammen mit Ihnen und Crick posthum den Nobelpreis bekommen hätte?

Watson: Ich glaube nicht. Wilkins gab uns die Strukturaufnahmen der A-Form, sie gab uns die B-Form. Man könnte also sagen, in einer idealen, vollkommenen Gesellschaft hätten die beiden den Preis für Chemie bekommen sollen, während Crick und ich den Biologie-Preis verdient hatten. Das wäre eine schöne Möglichkeit gewesen, alle vier zu ehren. Aber niemand dachte daran. Wir sind sehr berühmt, weil die DNA sehr berühmt ist. Hätte Rosalind schon 1951 mit Francis gesprochen und ihm ihre Daten zugänglich gemacht, dann hätte sie die Struktur aufgeklärt und wäre heute berühmt.

Rennie: Binnen eines Jahrhunderts wurden die Mendel'schen Regeln wieder entdeckt, die Chromosomen als Träger der Erbinformation erkannt und die Buchstaben des menschlichen Genoms weitgehend entziffert. Die Entdeckung der Doppelhelix fällt ziemlich genau in die Mitte. Wie viel gibt es da für uns noch zu tun, was die DNA betrifft? ▷



MIRIAM CHUA, COLD SPRING HARBOR LABORATORY

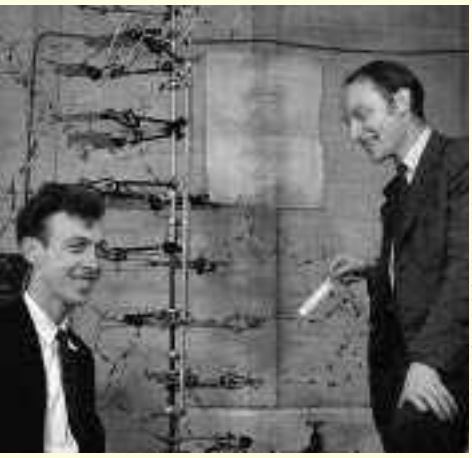
James D. Watson, Mitentdecker der DNA-Doppelhelix, arbeitet seit 1968 am Cold Spring Harbor Laboratory auf Long Island.

Das Triumvirat

Die glücklichen Gewinner

Für die Aufklärung der DNA-Struktur erhielten 1962 Francis Crick, James Watson und Maurice Wilkins den Nobelpreis für Physiologie oder Medizin.

Francis H. C. Crick (*1916) arbeitete als Physiker an dem von Max Perutz gegründeten Labor für Molekularbiologie im englischen Cambridge, das rund ein Dutzend Nobelpreise erwirtschaftet hat. Da sein erster Anlauf auf eine Promotion durch den Zweiten Weltkrieg unterbrochen wurde, war er zur Zeit der Doppelhelix-Entdeckung noch Doktorand. Er hatte bereits theoretisch vorausberechnet, welche Röntgenbeugungsmuster von helikalen Strukturen zu erwarten sind. Deshalb war er von allen Beteiligten auch am besten qualifiziert, aus den Daten von Rosalind Franklin und Maurice Wilkins die korrekte Struktur abzuleiten. Nach der Doppelhelix leistete er weitere wichtige Beiträge zum Verständnis der Genfunktion und des genetischen Codes. Im Jahre 1976 wechselte er an das Salk-Institut im kalifornischen San Diego, wo er sich der damals als unwissenschaftlich verschrienen Erforschung des Bewusstseins zuwandte.



A. BARRINGTON BROWN, PHOTO RESEARCHERS, INC.

Watson (links) mit Crick vor dem Doppelhelix-Modell 1953

James D. Watson (*1928), von Haus aus Genetiker, kam im Herbst 1952 als junger Postdoktorand an das Cavendish-Labor im englischen Cambridge. Dort lernte er Crick kennen und entwickelte mit ihm das Doppelhelix-Modell der DNA-Struktur, dessen Entdeckungsgeschichte er in seinem weithin bekannten Buch »Die Doppelhelix« geschildert hat. Nach seiner Rückkehr in die USA arbeitete er zunächst einige Zeit am California Institute of Technology in Pasadena, bevor er eine Professur an der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts) antrat. Von 1968 bis Januar 1974 leitete er als Direktor das Cold Spring Harbor Labor im Bundesstaat New York, dessen Präsident er seither ist. Sein jüngstes Buch »DNA: The Secret of Life« erscheint demnächst.

ULLSTEINBILD

Maurice Wilkins vor dem Modell

Maurice H. F. Wilkins (*1916) war als Physiker an der Entwicklung des Radars und der Atombombe beteiligt. Er kam ebenso wie Crick nach dem Zweiten Weltkrieg zu dem neuen Forschungsgebiet der Biophysik. Am King's College in London begann er 1947 die ersten röntgenkristallografischen Untersuchungen an DNA. Seine Zusammenarbeit mit Rosalind Franklin begann mit einem fundamentalen Missverständnis (sie glaubte, das Arbeitsgebiet zu übernehmen, er betrachtete sie als seine Untergebene). Wilkins zeigte Watson und Crick die Daten von Rosalind Franklin, ohne deren Einverständnis einzuholen. Als weniger berühmter »dritter Mann der DNA« – aber immerhin einer der berühmtesten Neuseeländer aller Zeiten – erhielt er mit Watson und Crick den Nobelpreis für Physiologie oder Medizin. Er wurde 1969 der Gründungspräsident der Britischen Gesellschaft für soziale Verantwortung in der Wissenschaft.

▷ **Watson:** Ich glaube, das große Problem ist das Chromatin [der dynamische Komplex aus DNA und Histonproteinen, der die Chromosomen bildet]. Was entscheidet darüber, ob ein bestimmter DNA-Abschnitt im Chromosom aktiv ist, wo ihn doch Histone umhüllen? Man kann mehr erben als nur die reine DNA-Sequenz. Da liegen heute die spannenden Fragen der Genetik.

Und man scheint schnell voranzukommen. Prognosen will niemand abgeben, aber ich schätze, das Gebiet wird in zehn Jahren ziemlich abgegrast sein. Daran arbeiten heute eine Menge sehr kluger Köpfe. Und das Instrumentarium dazu haben wir auch. Irgendwann werden die genetischen Grundprinzipien, was die Genfunktion anbelangt, bekannt sein, und dann werden wir sie stärker auf andere Fragen – wie die nach der Arbeitsweise des Gehirns – anwenden können.

Rennie: Wenn Sie heute noch einmal als Wissenschaftler anfangen würden …

Watson: … dann würde ich mich mit irgendwelchen Zusammenhängen zwischen Genen und Verhalten beschäftigen. Man kann Gene für Verhaltensweisen finden, aber das sagt noch nichts darüber aus, wie das Gehirn funktioniert.

Ganz am Anfang galt mein wissenschaftliches Interesse dem Vogelzug. Solange man nicht weiß, wie das Gehirn eines Vogels arbeitet, kann man auch nichts darüber sagen, wie die Gene dem Tier befehlen, wohin er zu reisen hat. Denn wissen Sie: Die Vogelmutter sagt dem Jungen nicht, wohin es fliegen soll! Das Ganze muss also angeboren sein.

Es gibt noch eine Menge anderer großer Themen zum Verhalten. Manche Menschen halten es für ein Rätsel, dass ein Mann einen anderen Mann lieben kann, aber ich sage: Das ist nicht rätselhafter als die Frage, warum Männer Frauen lieben!

Diese Dinge sind so kompliziert. Francis [Crick] behauptet steif und fest, in der Hirnforschung gebe es kein Pendant zum DNA-Molekül. Sie habe kein solch zentrales Element, dem alles andere entspringt.

Rennie: Sie stehen im Ruf, sich sehr unverblümt zu äußern, und das bringt Ihnen Kritik ein. Bereuen Sie manches von dem, was Sie gesagt haben?

Watson: Manchmal schon. Ich glaube, ich leide ein wenig an der gleichen Schwäche, die Tennisstar John McEnroe so offenkundig an den Tag legt. Ich kann einfach nicht auf einer Tagung sitzen und zuhören, wie

die Leute Unsinn reden, ohne ihnen zu sagen, dass es Unsinn ist!

Rennie: In der Öffentlichkeit wird heute vieles diskutiert, was mit Genen zu tun hat: gentechnisch veränderte Lebensmittel, DNA-Fingerabdrücke und so weiter. Wie viel Vertrauen haben Sie in die politische Überwachung solcher Dinge?

Watson: Ich glaube, sie sind so umstritten, dass der Staat sich nicht einmischen sollte. Ja, ich würde mich raushalten, genau wie [die Regierung] sich bei der Abtreibung raushalten sollte. Entscheidungen hinsichtlich der Fortpflanzung sollten nicht vom Staat getroffen werden, sondern von den Frauen.

Nach meiner Ansicht ist das Klonen heute das wichtigste Thema. Aber der erste Klon ist nicht vergleichbar mit der ersten Atombombenexplosion. Der Klon tut niemandem weh!

Ich kenne einen berühmten französischen Wissenschaftler, der nie Kinder hatte, weil in seiner Familie eine Geisteskrankheit vorkommt. Er wollte nicht noch mehr davon riskieren. Genau das meine ich. Klonen kann bedeuten, dass man ganz genau weiß: Es wird keinen neuen Fall geben. Im Mittelpunkt sollten nach meiner Überzeugung die Interessen der Familie stehen und nicht die des Staates.

Die Leute sagen: »Aber das wären ja Designerbabys.« Und ich antworte: »Gut, was ist denn so schlimm an Designer*kleidung*?« Wäre es nicht schön, wenn man sagen könnte: »Mein Kind wird sicher kein Asthma haben«? Was ist so schlimm am therapeutischen Klonen? Wem tut es weh?

Wer glaubt, jede Pflanze sei zu einem bestimmten Zweck von einem Gott geschaffen – der mag der Ansicht sein, man solle nichts daran ändern. Aber Amerika ist heute nicht mehr so wie zur Zeit der Pilgerväter. Wir haben alles verändert. Uns ging es nicht darum, die Vergangenheit zu respektieren, sondern es besser zu machen. Und nach meiner Überzeugung richtet sich jeder Versuch, andere am Verbessern von Dingen zu hindern, gegen den Geist des Menschen. ◁

LITERATURHINWEISE

The double helix – 50 years: Nature, Supplement, Bd. 421, 2003.

DNA: The Secret of Life. Von James D. Watson, Knopf 2003 (im Druck).

Die englische Langfassung dieses Gesprächs finden Sie unter www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Auf den Schultern von Riesen

Die Mitwirkenden

Rosalind E. Franklin (1920–1958) führte am King's College in London zwischen 1951 und 1953 die röntgenkristallografischen Untersuchungen an der DNA aus. Die Physikochemikerin erkannte, dass das Molekül in zwei verschiedenen Strukturformen auftritt, seine Phosphatgruppen auf der Außenseite des Molekülstrangs angeordnet sein müssen und zwei Polymerketten in der Struktur enthalten sind.

Die harsche Behandlung, die Watson ihr in seinem Buch »Die Doppelhelix« zuteil werden ließ, führte zu einer Gegenbewegung und Vereinnahmung durch feministische Autorinnen, die in ihr eine Märtyrerin sahen. In ihrer neuen Franklin-Biografie sucht die Autorin Brenda Maddox einen Mittelweg. Zwar blieb Rosalind Franklin der Nobelpreis ohnehin versagt, da sie bereits vor der Preiszuteilung verstarb, doch sie genoss durchaus Anerkennung für ihre bahnbrechenden Experimente nicht nur auf dem DNA-Gebiet, sondern auch – dann am Birkbeck College in London – zur Struktur des Tabakmosaik-Virus. Franklin sah, so Maddox, das Doppelhelix-Modell als spekulative Theorie, demnach konnte aus ihrer Perspektive nicht von einem »Rennen« die Rede sein, bei dem sie übervorteilt worden wäre.

NOVARTIS FOUNDATION

Die Physikochemikerin Rosalind Franklin

Erwin Chargaff (1905–2002) begann 1935 an der Columbia-Universität in New York zu forschen. Der Chemiker lieferte das – neben den Röntgenstrukturdaten – wichtigste Indiz für die Entschlüsselung der Doppelhelixstruktur, als er 1950 zeigte, dass je zwei der vier DNA-Basen offenbar immer paarweise auftreten. In seinen Analysen fand er stets genauso viele Gs wie Cs und genauso viele As wie Ts (die Kürzel stehen für den Anfangsbuchstaben des jeweiligen Basennamens). Watson und Crick kannten diesen Befund als Chargaff-Regel, heute spricht man einfach von Basenpaarung. Als Alteuropäer, der dem österreichisch-ungarischen Kaiserreich entstammte und Karl Kraus als seinen einzigen Lehrer bezeichnete, stand Chargaff der nach 1953 entstehenden Molekularbiologie stets kritisch gegenüber. Er hat seine Sicht der Dinge in Essays und dem autobiografischen Werk »Das Feuer des Heraklit« zusammengefasst.

NATIONAL LIBRARY OF MEDICINE

Der Chemiker Erwin Chargaff

Linus C. Pauling (1901–1994) war der Riese, auf dessen Schultern Watson und Crick standen. Als Professor für theoretische Chemie am California Institute of Technology in Pasadena hatte Pauling – ebenfalls durch Intuition und Modellbau – zwei Hauptstrukturen der Proteine entdeckt: die Alpha-Helix und das Beta-Faltblatt der Proteine. Außerdem hatte er die Bedeutung der Wasserstoffbrücken für die Raumstruktur der Biomoleküle erkannt. Gene, so postulierte er bereits 1948, bestünden aus zwei komplementären Einheiten, die durch schwache Brücken bildende Wechselwirkungen zusammengehalten werden. Pauling erhielt den Nobelpreis für Chemie des Jahres 1954 für seine grundlegenden Arbeiten über die chemische Bindung sowie den Friedenspreis 1962 für die Kampagne gegen Atomtests. Seit den 1970er Jahren widmete er sich der Wirkung von Antioxidantien wie Vitamin C und E. Megadosen dieser Vitamine machten ihn zwar nicht unsterblich, doch er wurde immerhin 93 Jahre alt.

ULLSTEINBILD

Der Chemiker Linus Pauling

Die DNA: 1953 – 2003

Die Doppelhelix war nur der Anfang

Der berühmte Satz von Watson und Crick, der das Interview einleitet, stellte die neugeborene Wissenschaft der Molekularbiologie vor die Herausforderung, die Erbinformation und ihre Realisierung im Detail zu ergründen.

Man glaubt es kaum: Erst jetzt nähern wir uns einem vollständigen Verständnis dessen, wie die Abfolge der Bausteine in der Doppelhelix einerseits an nachfolgende Generationen weitergereicht und andererseits tatsächlich in Funktionen umgesetzt wird.

Im April 1953 war die frisch veröffentlichte Doppelhelix zwar ein außerordentlich elegantes Modell, das mit den verfügbaren Daten im Einklang stand, aber die genauen Mechanismen der Vererbung oder gar der Genfunktion blieben weiterhin im Dunkeln. Selbst der so »unmittelbar« nahe liegende Kopplermechanismus – man entzwirbele die Doppelhelix und benutze jeden Einzelstrang als Vorlage für die Synthese eines komplementären Gegenstrangs – konnte erst fünf Jahre später bewiesen werden. Matthew Meselson und Franklin Stahl erzeugten am California Institute of Technology isotopenmarkierte DNA: Nach einem Vervielfältigungszyklus entstanden zwei Doppelhelices, die jeweils einen markierten und einen unmarkierten Strang enthielten.

Eine noch größere Herausforderung war herauszubekommen, wie die genetische Information realisiert wird. Eine verwirrende Vielfalt von RNA-Molekülen (der DNA chemisch ähnlich), schien ebenso wie eine Ansammlung knubbeliger Teilchen, Ribosomen genannt, an der Herstellung von Proteinen in der Zelle beteiligt zu sein. Erst in den 1960er Jahren gelang die Entschlüsselung des genetischen Codes, der jedem »dreisilbigen Code-Wort« des genetischen Textes entweder eine Aminosäure oder ein Stoppsignal zuordnet. Francis Crick hatte postuliert, dass ein Adapter nötig sei, um den Code in Aminosäuren für ein Protein zu »übersetzen«. Dieser Adapter wurde tatsächlich entdeckt, es handelt sich um die Transfer-RNA.

Doch selbst mit diesem Wissen um den genetischen Code blieb das Erbmaterial ein schwieriges Forschungsobjekt. Jede Zelle enthält gewöhnlich nur ein oder zwei Exemplare von jedem ihrer DNA-Moleküle – im Vergleich zu Tausenden oder mehr Exemplaren eines bestimmten Proteinmoleküls. Methoden zur Untersuchung winziger Spuren von Biomolekülen fehlten noch. So war die Struktur und Funktion von Proteinen bis in die 1970er Jahre leichter zu ergründen als die von Nucleinsäuren, also von DNA und RNA.

Erst eine ganze Reihe wichtiger Errungenschaften brachte eine Wende. Sie ermöglichte es, Gene durch Einschleusen in Bakterien zu klonieren und schließlich sogar direkt im Reagenzglas zu vervielfältigen. Dadurch bekamen die Forscher ausreichende Mengen für weitere Untersuchungen in die Hand. Erst damit begann in den 1980er Jahren – rund dreißig Jahre nach der Doppelhelix – die eigentliche Blüte der Molekularbiologie und Gentechnik.

Die in der normalen Zelle vorhandene Substanzmenge bestimmte zwar nun nicht mehr die Grenzen des Erforschbaren. Doch waren die vorhandenen Methoden zum Sequenzieren und Analysieren von Genen noch viel zu langsam und teuer, gemessen an der schier unvorstellbaren Informationsmenge eines gesamten Genoms. Im menschlichen Erbgut galt es immerhin, die Abfolge von drei Milliarden Basen zu entziffern. Wenigstens konnten die Forscher zunehmend dazu übergehen, die Sequenz eines Proteins aus der seines Gens abzuleiten anstatt umgekehrt. Aber die Analyse auch nur eines einzigen Gens erforderte mühsame Handarbeit.

MIKE MEDICINE HORSE, HYBRID MEDICAL ANIMATION

Neue Methoden, die sich auf hoch empfindliche Fluoreszenzmarker stützten, ermöglichten es in den 1990er Jahren, die Gensequenzierung zu automatisieren. Als 1988 die ersten Pläne zur Entzifferung des menschlichen Genoms geschmiedet worden waren, erschien ein solches Projekt noch astronomisch teuer und aufwendig. Doch die Verfahren beschleunigten und verbilligten sich noch schneller als erhofft, sodass eine wahre Flut von Gendaten einzulaufen begann. 1995 publizierte die Gruppe von Craig Venter am Institute of Genomic Research das erste vollständig sequenzierte Erbgut eines echten Lebewesens (nur bei Viren war dies vorher gelungen). Es handelte sich um einen Krankheitserreger: das Pfeiffer-Bakterium. Das verhalf der Craig'schen Methode des »Schrotschuss-Sequenzierens« zur Anerkennung. Heute, acht Jahre später, ist das Erbgut von über hundert Arten entziffert, darunter von Mensch, Maus und Taufliege, aber auch von Pflanzen wie Reis und Ackerschmalwand sowie von zahlreichen Mikroben aus allen drei Urreichen des Lebens – Archaeen (früher Archaebakterien genannt), Bakterien und Eukaryonten (Organismen mit echtem Zellkern).

Angesichts dieser Informationsflut stellt die größte Herausforderung heute nicht mehr die Gewinnung von Daten dar, sondern ihre Interpretation und Einordnung. Bioinformatik ist zu einer eigenen Forschungsdisziplin angewachsen und zahlreiche Firmen bieten Produkte an, welche den Forschern beim »Datamining«, beim Absuchen der Daten nach interessanten Zusammenhängen, behilflich sind. Erst heute, fünfzig Jahre nach der Entdeckung der Doppelhelix, ist die DNA ein offenes Buch geworden, aus dem Wissenschaftler die Geheimnisse des Lebens erschließen können.

Michael Groß

Der Autor ist Biochemiker und Writer in Residence am Birkbeck College in London.

REPORT

Kraftwerke der Zukunft

Treibhauseffekt und schwindende Ölreserven machen den Ingenieuren Dampf. Zudem müssen ältere Kraftwerke bald ersetzt werden, während der Energiehunger wächst und wächst. Erneuerbare Energien, Brennstoffzellen, virtuelle Kraftwerke – es gibt viele Konzepte, die Probleme zu lösen.

NORDEX

INHALT:

Sonne & Co. 80
Interview: Energiesparen 84
Brennstoffzellen 85
Interview I: Kernspaltung 87
Interview II: Kernspaltung 88
Bessere Turbinen 89
Interview: Kernfusion 90

Weblinks zum Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

ERNEUERBARE ENERGIEN

Ausbruch aus der Nische

Noch spielen Sonne & Co. allenfalls regional eine Rolle. Doch langfristig könnten sie zu Global Playern aufsteigen.

Von Roland Wengenmayr

Erdgas, Öl und Kohle sind bewährte Energieträger, doch ihr Vorrat geht allmählich zur Neige und ihre Verbrennung setzt Treibhausgase frei. Wenn der Energiebedarf nicht drastisch sinkt, bleibt der Menschheit daher nur der Weg in die Kernenergie oder die Erschließung natürlicher, erneuerbarer Energiequellen im großen Stil.

Im Grunde gibt es davon nur zwei: die Strahlungsenergie der Sonne und die durch radioaktiven Zerfall im Erdinneren hervorgerufene Wärme. Sonnenenergie ist schon in Gebrauch, seit sich Menschen zum ersten Mal an einem Feuer wärmten, denn »Biomasse« wie Holz oder Stroh entsteht durch Fotosynthese, also durch die Umwandlung von Sonnenlicht in pflanzliche Substanz. Auch Wind und Wellen beruhen auf dem steten Energiefluss der Sonne, ebenso – über den Kreislauf von Regen und Verdunstung – die Turbinen antreibende Kraft von Stauseen und Flüssen. Die Erde absorbiert 10 000-mal mehr Strahlungsleistung, als die Menschheit heute benötigt. Die zweite große Quelle, die Geothermie, mutet ungleich exotischer an. Immerhin: Die Erde strahlt zehnmal mehr Wärme ins All ab, als die Menschen weltweit an Primärenergie verbrauchen.

Doch die Nutzung der regenerativen, das heißt sich erneuernden Energien steckt noch in den Kinderschuhen. Weltweit decken sie derzeit nur etwa vier Prozent des Primärenergiebedarfs (in Deutschland zwei Prozent). Ihr Anteil an der Stromerzeugung klingt mit 19 Prozent schon besser (in Deutschland sieben Prozent), doch der beruht weitgehend auf

Deutschland ist Weltmeister in Sachen Windparks. Doch der Platz ist knapp. Die Vision: Anlagen fern der deutschen Küste.

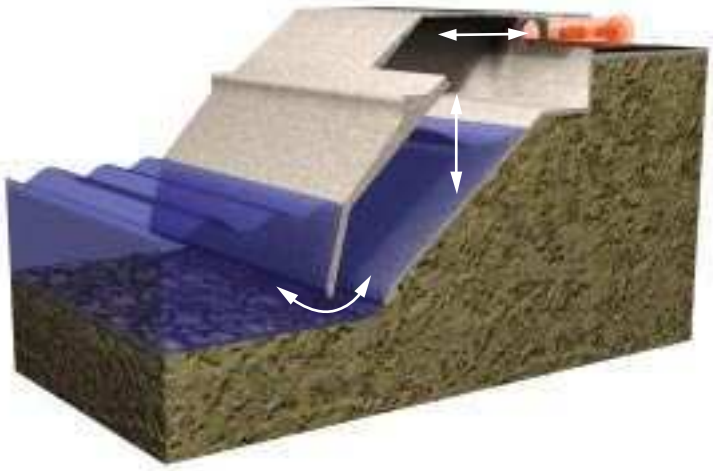
Wasserkraftwerken, die viel Landschaft »verbrauchen«.

Trotz aller Bedenken gegen die Nutzung bei diesigem Wetter: Die Fotovoltaik ist für unsere Breiten hervorragend geeignet. Solarzellen genügt die diffuse Strahlung unter bewölktem Himmel, um Sonnenlicht in Strom zu verwandeln. Allerdings verbraucht die Herstellung der Siliziumzellen so viel Energie, wie diese in fünf Jahren produzieren. Und sie sind teuer: Alle Investitionen eingerechnet, kostet eine fotovoltaisch erzeugte Kilowattstunde heute sechzig bis neunzig Cent, viel mehr als die 1,5 bis drei Cent für Strom aus konventionellen Kraftwerken.

Doch dank massiver staatlicher Förderung durch billige Kredite und einer hohen Rückvergütung des ins Netz eingespeisten Stroms erreichen Solarzellen in Deutschland immerhin 175 Megawatt maximaler elektrischer Leistung (Stand Ende 2001); weltweit sind es etwa 1500 Megawatt. Die weltgrößte Dachanlage – soeben von Phoenix SonnenStrom und Partnern wie etwa Shell Solar auf 2,1 Megawatt aufgestockt – befindet sich auf den Hallen der Münchner Messe.

Die starke Förderung der Fotovoltaik hat hier zu Lande einen Boom ausgelöst und Deutschland zum Weltmarktführer gemacht. Mitte der 1990er Jahre war dies noch anders: Solarzellenfabriken wurden ins Ausland verlegt oder als unrentabel geschlossen. Doch allein in den letzten drei Jahren hat die Industrie über eine Milliarde Euro in deutsche Solarfabriken investiert. Im sächsischen Freiberg betreibt eine Tochter des deutsch-schwedischen SolarWorld-Konzerns seit wenigen Monaten die größte Solarzellenfabrik Europas, die pro Jahr Zellen mit einer Gesamtleistung von dreißig Megawatt produzieren soll. RWE Schott Solar will bis 2004 mit seiner SmartSolarFab bei Alzenau sogar das Doppelte schaffen.

Dabei soll auch ein grundsätzliches Problem heutiger Produkte gelöst werden: Meist aus Standard-Silizium-Wafern hergestellt, sind die Zellen drei Millimeter dick, aber nur eine sehr dünne Schicht an ihrer Oberfläche verwandelt das einfallen- ▷



THOMAS BRAUN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT NACH WAVEGEN

Auf der britischen Insel Islay erzeugt ein Wellenkraftwerk 500 Kilowatt Strom. Das Wasser tritt in eine Kammer im felsigen Ufer ein und aus. Dadurch wird die Luft darin im Wechsel komprimiert und entspannt. Dieses »Atmen« treibt eine Turbine an und erzeugt so elektrischen Strom.

▷ de Licht in Strom. Um teures Halbleitermaterial zu sparen, sollen in Alzenau 0,3 Millimeter dünne, folienartige Zellen entstehen. Noch weiter geht das Start-up-Unternehmen Sulfurcell. Ab Sommer 2003 will es serienmäßig Glasscheiben mit einer 1,5 Mikrometer dünnen Schicht aus Kupfer-Indium-Diselenid (CIS) versehen und damit der Silizium-Technik Konkurrenz machen. Zwar erreichen CIS-Dünnschichtzellen bislang nur einen Wirkungsgrad von 13 Prozent (gegenüber etwa 16 bei Silizium), aber »wir kommen mit einem Prozent des sonst nötigen Halbleitermaterials aus«, erklärt Geschäftsführer Nikolaus Meyer. »Damit können wir mittelfristig die Kosten mindestens halbieren.«

Die Mittelmeer-Connection

Die Alternative zur Fotovoltaik, die Solarthermie, eignet sich vor allem für südlichere Gefilde, wo es über das Jahr genug direkte Strahlung gibt. Solarthermische Kraftwerke funktionieren wie ein großes Brennglas: Spiegel sammeln die Sonnenstrahlung und konzentrieren sie auf einen »Receiver«, durch den ein Transportmedium strömt, das sich erhitzt.

Als ausgereift gilt das Parabolrinnen-System: Parabelförmige »Spiegeltröge« fokussieren das Licht auf lange Absorberrohre in ihren Brennachsen. Durch sie strömt meist ein Thermoöl und transportiert die Energie zu einem Wärmetauscher. Der erhitzt den Dampf und dieser wiederum treibt Turbinen an. Parabolrinnen sind kostengünstig und gegen Witterungseinflüsse unempfindlich. In sonnenreichen Regionen arbeiten sie wirtschaftlich, wie die Solar Electric Generating Station in Kalifornien beweist. Hier steht das weltgrößte Solarkraftwerk mit 2,5 Millionen Quadratmeter Spiegelfläche. Es versorgt mit einer Spitzenleistung von 354 Megawatt 150 000 Menschen.

Derartige Kraftwerke erzeugen heute Strom für zehn bis 15 Cent pro Kilowattstunde. Sie sind also im Prinzip konkurrenzfähiger als die Fotovoltaik. Welchen Marktanteil sie künftig erobern werden, dürfte davon abhängen, wie viel Strom auf diese Weise in den Staaten des Sonnengürtels erzeugt und in die nördlichen Industriestaaten verkauft werden kann. Das Europäische Elektrizitätsnetz reicht heute bis in die Türkei und soll bis 2015 über Nordafrika und Gibraltar zu einem Ring um das Mittelmeer geschlossen werden. Dann könnte Solarstrom in Marokko zu sechs Cent pro Kilowattstunde produziert und – einer Schätzung des Instituts für Solare Energieversorgungstechnik ISET in Kassel zufolge – für weitere zwei Cent von Marokko über Spanien nach Deutschland geleitet werden.

Die Windenergie liegt schon jetzt mit nur geringer staatlicher Förderung in der Größenordnung einer wirtschaftlich sinnvollen Stromerzeugung: Bei Anlagen im Binnenland betragen die Herstellungskosten je nach Standort zwischen 5,5 und 13 Cent pro Kilowattstunde. Weltweit liefert Windkraft bereits 27 Gigawatt elektrischer Leistung, 75 Prozent davon werden in Europa erzeugt und versorgen fünf Millionen Menschen mit Strom (Spektrum der Wissenschaft 10/2002, S. 78). Der Wind-Weltmeister ist Deutschland mit mehr als 12 000 »Mühlen« und zehn Gigawatt Gesamtleistung. Im Jahr 2001 erzeugten sie etwa 2,3 Prozent des hier zu Lande produzierten Stroms und sparten so über zehn Millionen Tonnen Kohlendioxid ein.

Windenergieanlagen sind Hightech-Systeme, betont Ralf Peters von Nordex, einem der größten Hersteller. Der Wirkungsgrad erreicht bis zu 45 Prozent. Bei Neuinstallationen dominieren blattgeregelte Systeme, die ihre Rotoren je nach Windgeschwindigkeit verstellen können. Rotoren bis zu hundert Meter Durchmesser sitzen auf über achtzig Meter hohen Türmen und produzieren bis zu 2,5 Megawatt. In dieser Höhe können allerdings sprunghafte Windböen zu einem ernsten Problem werden (Spektrum der Wissenschaft 2/2002, S. 10). Deshalb messen Sensoren ständig bis zu 300 verschiedene Parameter für das autonome Steuersystem.

In Mitteleuropa wird allerdings der Platz für neue Anlagen schon knapp. Eine Alternative wären die Küstengewässer der Nord- und Ostsee, wo zudem mehr Wind weht und bis zu vierzig Prozent mehr Energie produziert werden kann als an Land. Die Nase vorn hat Dänemark mit einem Park 14 Kilometer nordöstlich vor Esbjerg. Im rund zehn Meter tiefen Küstenwasser stehen dort achtzig Windgeneratoren mit einer Gesamtleistung von 160 Megawatt.

Schifffahrtsstraßen, militärische Manövergebiete, Rohstoffgewinnung, Fischgründe und Naturschutz zwingen die deutschen Offshore-Planer sogar in Gebiete, die dreißig bis vierzig Kilometer vor der Nordseeküste liegen. Dort ist das Wasser zwischen zwanzig und vierzig Meter tief, und die See kann sehr rau sein. Laut Christian Nath, Geschäftsführer von Germanischer Lloyd WindEnergie, wären dort erst Windanlagen mit fünf Megawatt Leistung in der Lage, ökonomisch zu arbeiten. Heute gibt es aber nur ausgereifte Anlagen für zwei bis drei Megawatt. Windräder mit höherer Leistung sind erst im Probebetrieb. Im Meer müssen sie zudem extreme Bedingungen zuverlässig verkraften. Es wird wohl noch Jahre dauern, bis in der Nordsee große deutsche Offshore-Windparks entstehen.

Windräder unter Wasser

Wind setzt nicht nur Rotoren in Bewegung, sondern regt auch Meereswellen an. Die speichern global pro Jahr fast hundertmal mehr Energie, als die Menschheit verbraucht. Die Forschung steckt hier jedoch noch in den Anfängen. Experimentelle Anlagen verstromen die Wellenbewegung meist nach dem Prinzip einer oszillierenden Wassersäule: Das Wasser dringt in eine unten offene Kammer ein und schwingt darin auf und ab (siehe Bild oben). Dabei schiebt es Luft durch eine Turbine ins Freie oder saugt sie von dort an. Die Spezialturbine verwandelt dieses »Atmen« in einen möglichst gleichmäßigen elektrischen Strom. Seit dem Jahr 2000 versorgt Limpet-500, eine Pilotanlage mit immerhin 500 Megawatt elektrischer Leistung, die britische Insel Islay mit Strom.

Einen anderen Weg, Energie aus dem Meer zu gewinnen, beschreiten Gezeitenkraftwerke, die den Wechsel zwischen Ebbe und Flut nutzen. Seit 1966 steht eine solche Anlage mit 240 Megawatt elektrischer Leistung in der Mündung des französischen Flusses Rance nahe Saint Malo. Eine große Mauer schottet die Rance gegen das Meer ab, und je nach Wasserstand im Ärmelkanal strömt entweder das Flusswasser durch 24 Turbinen ins Meer oder umgekehrt Meerwasser in die Flussmündung. Solche Kraftwerke können aber nur an Orten mit extrem hohem Tidenhub arbeiten. Darüber hinaus ist die Anlage La Rance sehr korrosionsanfällig und verändert das ökologische System der Flussmündung. Deshalb arbeiten Entwickler an alternativen Konzepten, beispielsweise mit Türmen und Rotoren unter Wasser, sozusagen »Unterwasser-Windkraftanlagen«. Ein derartiges System mit 350 Kilowatt Leistung wird vor der Küste Cornwalls getestet. Eine erste Studie der EU konstatierte, dass Europa 106 geeignete Standorte bietet, geschätzte Gesamtleistung: 12 500 Megawatt.

Während Sonne und Wind nicht ständig Energie liefern, steht Erdwärme rund um die Uhr zur Verfügung. Global spielt die Geothermie noch eine kleine Rolle: Im Jahr 2000 erreichte sie eine elektrische Gesamtleistung von acht Gigawatt – immerhin dreimal so viel wie Fotovoltaik und Solarthermie zusammen. Die meisten Kraftwerke stehen in vulkanisch aktiven Gebieten wie etwa beim isländischen Krafla-Vulkan, wo sechzig Megawatt elektrischer Leistung erzeugt werden. Sie nutzen erhitztes Grundwasser mit Temperaturen über hundert Grad Celsius. Aus ihren kilometertiefen Bohrlöchern schießt aber nicht nur Dampf, sondern gelegentlich auch heiße, ätzende Brühe. Wie Sekt, der beim Entkorken aufschäumt, gast sie beim Entspannen und Abkühlen unter anderem Kohlendioxid aus. Krafla emittiert aber trotzdem zehnmal weniger CO_2 als ein Kohlekraftwerk gleicher Leistung.

Emissionsfrei arbeitet das neue Hot-Dry-Rock-Verfahren. Weil der Erdmantel in etwa fünf Kilometer Tiefe zwischen 150 und 200 Grad Celsius heiß ist, kann zerklüftetes Gestein dort als natürlicher Wärmetauscher dienen.

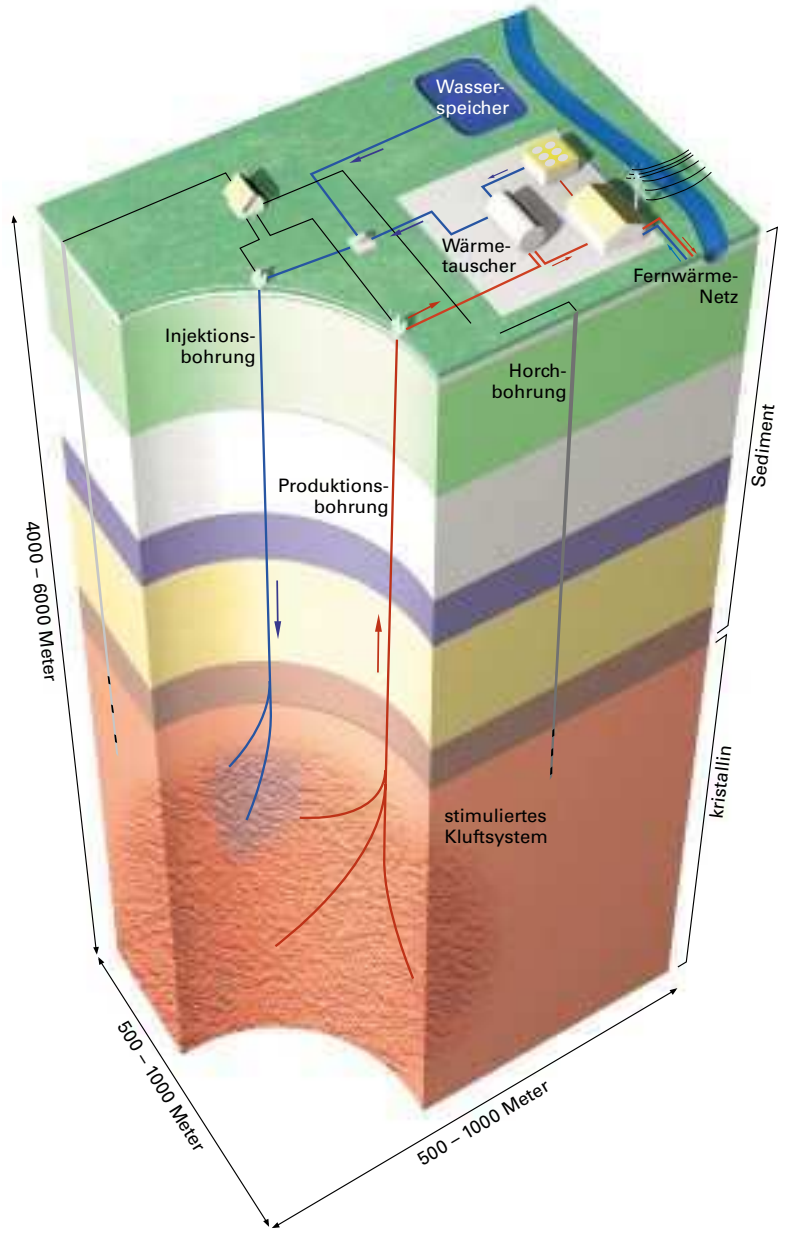
Bohren nach Wärme

Über Injektionsbohrungen presst ein Kraftwerk kaltes Wasser hindurch und fördert es durch andere Bohrungen überhitzt wieder zu Tage. Während die oberirdische Technik Standard ist, stellt der künstlich erweiterte Wärmetauscher in der Tiefe das eigentliche Neuland dar. In zwei Jahren soll die europäische Pilotanlage im elsässischem Soultz-sous-Forêts rund zwanzig Megawatt Wärme und bis zu sechs Megawatt Strom produzieren. Die Schweiz plant Ähnliches: Die »Deep Heat Mining« genannte erste kommerzielle Anlage soll Basel mit Fernwärme versorgen.

Ein viel versprechender Ansatz, die mangelnde Beständigkeit vieler regenerativer Energiequellen auszugleichen, sind »virtuelle Kraftwerke«, also der Zusammenschluss kleiner Energieerzeugungsanlagen zu einem virtuellen Großkraftwerk. Ein Energiemanagementsystem ermittelt den Bedarf der angeschlossenen Verbraucher an Strom und Wärme, beauftragt die Kleinkraftwerke und gleicht ihre Leistung miteinander ab. Ein solches System ist deutlich weniger von Windflauten oder bedecktem Himmel abhängig.

Immerhin hat die Enquete-Kommission des Deutschen Bundestages empfohlen, bis zum Jahr 2050 die Hälfte des Strom- und Wärmebedarfs in Deutschland aus erneuerbaren Energiequellen zu decken. In einem Punkt sind sich alle Experten einig: Ohne staatliche Förderung werden diese Techniken mittelfristig nicht konkurrenzfähig sein. Sonne, Erdwärme und Wind brauchen einen langen Atem. ◁

Roland Wengenmayr ist Redakteur von »Physik in unserer Zeit« und Journalist.



THOMAS BRAUN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: MARKUS O. HÄRING

Nahe Basel soll Erdwärme nach dem Hot-Dry-Rock-Verfahren Strom erzeugen. Neben der Injektions- und Produktionsbohrung überwachen Horchbohrungen das Verhalten des unterirdischen »Wärmetauschers«, einem künstlich erweiterten System von Gesteinsklüften.

INTERVIEW

»Die vergessene Säule der Energiepolitik«

Energiesparen muss künftig wesentlich stärker gefördert werden, um Probleme wie den Treibhauseffekt in den Griff zu bekommen, meint Peter Hennicke, Volkswirtschaftler und Präsident des Wuppertal-Instituts für Klima, Umwelt, Energie.

Spektrum der Wissenschaft: Sparen ist derzeit in aller Munde, doch nur selten wird dabei auch vom Energiesparen gesprochen …

Prof. Dr. Peter Hennicke: Das ist mehr als bedauerlich, denn allein in Deutschland ließen sich die Energieausgaben jährlich um bis zu sechzig Milliarden Euro reduzieren, das ist eine glatte Halbierung. Wir müssten dazu beispielsweise den Gebäudebestand besser gegen Wärmeverlust isolieren, elektrische Antriebe in der Produktion auf den neuesten Stand der Technik bringen, Spritfresser durch effizientere Autos und alte Haushaltsgeräte gegen Strom sparende austauschen.

Spektrum: Das klingt nach erheblichem Aufwand.

Hennicke: Der aber wichtig ist. Alle Szenarien deuten darauf hin, dass das Energiesparen in den kommenden dreißig Jahren den Hauptbeitrag zur Schonung fossiler Ressourcen und zur Reduzierung der Treibhausgase leisten muss. Wir könnten den Energieeinsatz zwischen dreißig und siebzig Prozent verringern, und zwar nur dadurch, dass wir den heutigen Stand der Technik allgemein umsetzen.

Spektrum: Aber wie soll das praktisch vonstatten gehen?

Hennicke: In erster Linie muss ein Umdenken stattfinden. Energiesparen lohnt sich langfristig fast immer – auch bei zunächst vielleicht höheren Kosten für den sparsameren Kühlschrank oder das Sprit sparende Auto. Etwa zwei Drittel des deutschen Energiesparpotenzials lassen sich allein durch rationellere Energienutzung in privaten Haushalten und beim Individualverkehr realisieren.

Spektrum: Offenbar ist es bislang noch nicht gelungen, dieses Bewusstsein zu verankern.

Hennicke: Natürlich, denn Energiesparen ist zunächst sehr abstrakt. Es müsste sinnlich wahrnehmbar gemacht werden. Was sagt einem schon die Energieverbrauchsklasse A oder G? Wer eine Waschmaschine kauft, der möchte möglichst direkt sehen, um wie viel teurer ihn Gerät X gegenüber Gerät Y im Stromverbrauch kommt. In den USA gibt es dazu ein Energy-Guide-System, das diese Information über kleine Zeiger verdeutlicht. Gerade hier vermisse ich die Initiative der Politik. Ein effektives Energiesparprogramm existiert bisher nicht. Für mich ist das die vergessene Säule der Energiepolitik.

Spektrum: Was sollte die Regierung tun?

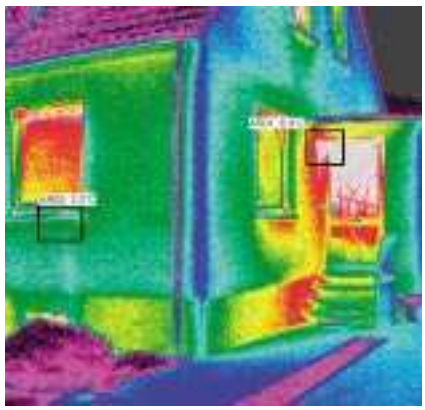
Hennicke: Zunächst müsste sie dem Verbraucher dieses Thema in verschiedenen Kampagnen nahe bringen. Ganz wichtig wären aber auch Maßnahmen, die das Energiesparen attraktiv machen, wenn es sich scheinbar nicht rechnet.

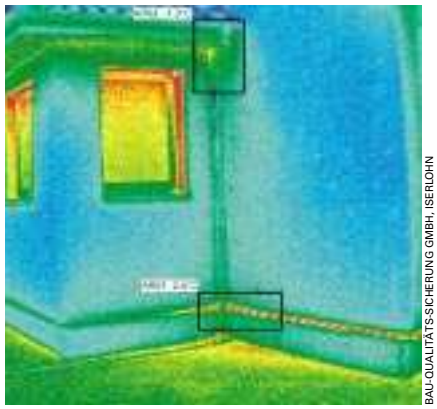
Spektrum: Können Sie dafür ein Beispiel geben?

Hennicke: Bisher hat ein Vermieter kaum Interesse, sein Haus gegen Wärmeverluste zu dämmen. Da er die Heizkosten umlegt, käme diese Maßnahme nur dem Geldbeutel der Bewohner zugute. Doch was wäre, wenn sich ein potenzieller Mieter oder Hauskäufer anhand eines Energiepasses vorab informieren kann, wie hoch die monatlichen Nebenkosten tatsächlich sind? Ein solches Zertifikat sollte man verbindlich und flächendeckend einführen. Das wäre für den Vermieter ein Anreiz, sein Haus zu dämmen, weil er so die Vermietbarkeit erhöht.

Spektrum: Sicher wird auch die Industrie ihren Teil zum Energiesparen beitragen müssen.

Hennicke: Richtig. Auch wenn Manager heute andere Sorgen haben, können wir ihnen auf Euro und Cent beweisen, dass Energiesparen die Umsatzrendite erhöht. Im Schnitt lassen sich zwischen zwanzig und sechzig Prozent der Energiekosten einsparen. Das glaubt uns zunächst natürlich niemand. Wenn wir dann aber durch den Betrieb gehen und zeigen, dass hier ein Leck ist, da die Druckluft optimiert werden kann und dort Motoren unnötig lange laufen, sieht die Sache schon anders aus. In Dänemark sind solche Betriebsbegehungen sogar vorgeschrieben. Wer das nicht will, der muss eine Energiesteuer entrichten. So werden Firmen mit sanftem Druck dahin gebracht, die Energieeffizienz ihres Betriebes zu optimieren. Zum eigenen Nutzen, denn am Ende zahlen sie weniger Geld für Strom und Wärme.





BAU-QUALITÄTS-SICHERUNG GMBH, ISERLOHN

Die Thermografie zeigt Hausbesitzern in orange-rot, wo sie sparen könnten – diese Bereiche der Außenwand sind zu warm und sollten besser gedämmt werden.

WUPPERTALINSTITUT

Prof. Dr. Peter Hennicke, der Präsident des Wuppertal-Instituts für Klima, Umwelt, Energie, hält eine Energiesparpolitik mit marktwirtschaftlichen Anreizen als unabdingbar für die Verbreitung erneuerbarer Energien.

Spektrum: Wäre eine solche Regelung auch für Deutschland denkbar?
Hennicke: Ich vermute ja. In erster Linie brauchen wir aber eine politische Akzentsetzung anderer Art – einen Energiesparpakt, der Politik, Bürger und Industrieunternehmen verbindet. Das zentrale Element eines solchen Paktes wäre ein Energiefonds, der mit einer kaum spürbaren Abgabe von wenigen zehntel Cent pro Kilowattstunde finanziert würde.
Spektrum: Eine neue Abgabe? Die dürfte den Bürgern gegenwärtig nur schwer zu vermitteln sein.
Hennicke: Nicht, wenn man ihnen deutlich macht, dass die Abgaben letztlich zu einer Verringerung der Energiekosten führen und damit dann wieder allen zugute kommen. Bis zu 1,5 Milliarden Euro jährlich könnten in den Fonds fließen, um dann zum Beispiel Kampagnen zur Einführung sparsamer Haushaltsgeräte oder die Installation effizienterer Druckluftsysteme zu finanzieren.
Spektrum: Gibt es Vorbilder für einen solchen Energiepakt?
Hennicke: Sowohl in Großbritannien und Dänemark als auch in den Niederlanden wurden derartige Fonds bereits erfolgreich realisiert. In Deutschland gibt es immerhin schon regionale Beispiele. So haben die Stadtwerke Hannover den Kilowattstundenpreis geringfügig erhöht und mit dem Geld eine Energiesparkampagne finanziert sowie den Kauf effizienter Kühlgeräte gefördert. Inzwischen wird aus diesem Topf die bessere Wärmedämmung von Gebäuden unterstützt. Das machte den Bau neuer Energieerzeugungsanlagen unnötig. Statt eines realen Kraftwerks entstand in Hannover ein Energiesparkraftwerk.
Spektrum: Man könnte aus einem solchen Fonds natürlich auch in regenerative Energien investieren.
Hennicke: Das ist sogar dringend zu empfehlen; denn bei volkswirtschaftlicher Betrachtung dürften die erneuerbaren Energien nur dann eine wirkliche Chance auf rasche Markteinführung haben, wenn man sie aus den eingesparten Energiekosten mitfinanziert. Und das bedeutet: Nur wenn wir die Energieausgaben bundesweit verringern, wird ein erheblicher Stromzuwachs aus Sonne, Wind und Wasserstoff bezahlbar sein. ◁

Das Interview führte **Tim Schröder**. Der Biologe und Physiker war Redakteur im Wissenschaftsressort der Berliner Zeitung. Er lebt als freier Autor in Oldenburg.

BRENNSTOFFZELLEN

Das Kraftwerk im Keller

Die kalte Verbrennung von Wasser- und Sauerstoff ist der Hoffnungsträger für die Energiewirtschaft. Doch noch sind Brennstoffzellen für den Massenmarkt viel zu teuer.

Von Norbert Aschenbrenner

Die Zukunft hat scheinbar schon begonnen: Deutschlands größter Energieversorger RWE prophezeit in einem Werbespot Brennstoffzellen in Supermarktregalen. Denn in fünf bis zehn Jahren soll diese Technologie Haushalte mit Strom und Wärme versorgen. Bis zum Jahr 2015 könnte sie nach Meinung des Unternehmens etwa zehn Prozent der Stromerzeugung in Deutschland abdecken.«

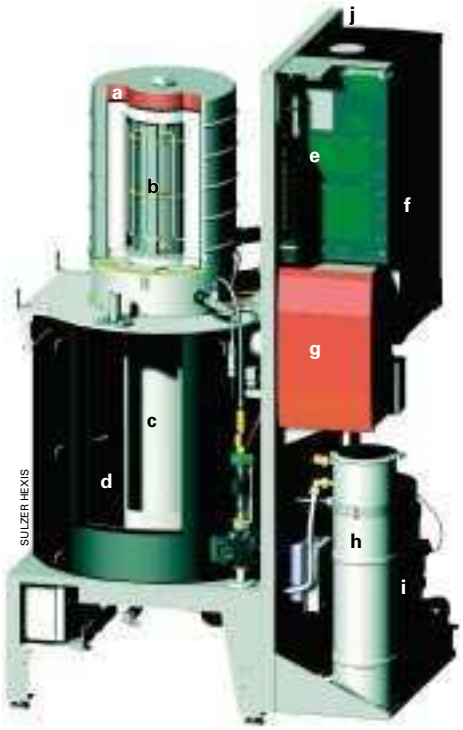
Doch nach Branchenangaben kosten solche Kraftpakete in der Herstellung zurzeit zwischen 20 000 und 50 000 Euro pro Kilowatt elektrischer Leistung, konkurrenzfähig wären aber erst 1000 bis 1500 Euro. Dennoch sind die Plätze auf dem neuen Markt schon heiß umkämpft. Denn Schadstoffe wie bei der Verbrennung fossiler Energieträger fallen hier nicht an. Wasserstoff und Sauerstoff reagieren zu Wasser, dabei werden Elektronen frei – es entsteht elektrischer Strom.

Dass dabei nicht die vom Chemieunterricht bekannte explosive Knallgasreaktion erfolgt, dafür sorgt eine räumliche Trennung der beiden Partner, die nur über ein ionenleitendes Medium, den Elektrolyten, miteinander reagieren können (Spektrum der Wissenschaft 7/1995, S. 88; 9/2001, S. 66). Den Sauerstoff liefert die Umgebungsluft, schwieriger ist die Versorgung mit Wasserstoff, da eine entsprechende Infrastruktur derzeit fehlt. Als Alternative kommen Kohlenwasserstoff-Verbindungen – etwa Erdgas – in Frage, die in Hochtemperatur-Zellen von selbst in Wasserstoff, Kohlendioxid und -monoxid zerfallen. Bei geringeren Betriebstemperaturen benötigt diese Umwandlung einen aufwendigen »Reformierungsprozess«. Erdgas ist reichlich vorhanden – auch bei steigendem Konsum sind die heute bekannten Vorkommen erst in rund 65 Jahren erschöpft. Zudem gibt es ein Leitungsnetz, an dem bereits viele Haushalte angeschlossen sind.

Auch ökonomisch haben Brennstoffzellen großen Charme: Das Szenario sieht so aus, dass etwa ein Hausbesitzer oder auch der Verwalter eines Hochhauses eine Brennstoffzelle erwirbt oder mietet und den überschüssigen Strom ins Netz einspeist. Damit wird er Teil eines vom Strom- ▷

Im Brennstoffzellen-Pavillon in Essen testet RWE Brennstoffzellentypen auf ihre Praxistauglichkeit. Die 100- bis 300-Kilowatt-Anlagen versorgen ein benachbartes Multimedia-Erlebniszentrum mit Strom und Wärme oder Kälte.

RWE AG



Mehr als hundert solcher Anlagen von Sulzer-Hexis werden zur Zeit in privaten Haushalten getestet. Sie decken den gesamten Wärmebedarf und den Grundbedarf an Strom eines Einfamilienhauses ab.

a Wärmeisolation
b Brennstoffzellenstapel
c Wärmetauscher
d Wärmespeicher
e Steuerung
f Zusatzheizgerät
g Wechselrichter
h Gasentschwefelung
i Wasserenthärter
j Abgas

SIEMENS AG

Mit einem neuen Design extrem flacher Festoxid-Brennstoffzellen lassen sich erheblich Material und Kosten einsparen: Der flache Röhrenverbund liefert bei gleichem Gewicht die dreifache Leistungsdichte bisheriger Brennstoffzellenröhren.

▷ versorger organisierten Verbundes. Auf diese Weise könnten Tausende von Brennstoffzellen gemeinsam mit Solarzellen, Windrädern und Biomasse-Kraftwerken ein »virtuelles Kraftwerk« bilden, von einem Computersystem gemanagt. Und noch ein Pluspunkt: Statt Strom über Hunderte von Kilometern mit Verlusten zu transportieren, ist es wirtschaftlich günstiger, ihn dezentral zu erzeugen und die ebenfalls entstehende Wärme gleichzeitig zum Heizen zu nutzen.

Für Versorger wie RWE ist es daher keine Frage, ob die Brennstoffzelle kommt, sondern nur noch wann. Das Unternehmen testet in Essen je eine Anlage der DaimlerChrysler-Tochter MTU Friedrichshafen und von Siemens auf ihre Praxistauglichkeit. MTU setzt mit seinem US-Partner Fuel Cell Energy auf das so genannte HotModule, eine 250 Kilowatt Strom liefernde Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (MCFC), die bei rund 650 Grad Celsius betrieben wird (bei dieser Temperatur wird das Karbonat leitfähig und fungiert als Elektrolyt). Eine solche Anlage lief bereits 16 000 Stunden mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 47 Prozent.

Wirkungsgrad: mehr als 55 Prozent

Die noch sehr hohen Kosten will das Unternehmen unter anderem mit einem vereinfachten Aufbau des Gesamtsystems senken. Denn das Drumherum um die Brennstoffzelle macht etwa zwei Drittel der Kosten aus. Das größte Einsparpotenzial bietet die Produktion. Denn jedes HotModule ist heute noch ein handgefertigtes Einzelstück. Bei Serienfertigung seien nochmals fünfzig Prozent Einsparungen möglich. Im Jahr 2006 soll es so weit sein.

Siemens hält es mit der Hochtemperatur- oder Festoxid-Brennstoffzelle (SOFC, *solid oxide fuel cell*). Darin wird der Brennstoff bei etwa tausend Grad Celsius durch lange Röhren geschickt, deren Wandmaterial, ein yttriumdotiertes Zirkonoxid, bei der hohen Temperatur für Sauerstoff-Ionen durchlässig und somit zum Elektrolyten wird. Die SOFC bringt es auf einen elektrischen Wirkungsgrad von rund fünfzig Prozent. Eine 110-Kilowatt-Anlage lief in den Niederlanden mehr als drei Jahre im Dauerbetrieb. Wenn eine Mikro-Gasturbine nachgeschaltet wird, die aus dem heißen Abgas zusätzlichen Strom erzeugt, steigt der Wirkungsgrad steigt sogar auf mehr als 55 Prozent. Eine solche Anlagen steht seit Ende 2001 in der University of California in Irvine. Das System leistet 220 Kilowatt, wobei zwanzig Kilowatt von der Mikro-Gasturbine kommen.

Siemens baut derzeit in einem Vorort von Pittsburgh in Pennsylvania eine Fabrik für Brennstoffzellen-Kraftwerke. Die Kosten sollen unter anderem durch Materialeinsparungen gedrückt werden. Statt Röhren wollen die Entwickler künftig flache Platten mit benachbarten Öffnungen verwenden. Der Strom muss deutlich geringere Wege zurücklegen, was den elektrischen Widerstand mehr als halbiert. Die abgeflachten Zellen sollen bei gleichem Gewicht und gleichem Materialverbrauch dreimal mehr Leistung bringen.

Derartige Anlagen sind auf 250 Kilowatt bis zu fünf Megawatt ausgelegt, also ideal für größere Häuserkomplexe, Hochhäuser, Industrieanlagen, Einkaufszentren oder Krankenhäuser. Das Schweizer Unternehmen Sulzer Hexis konzentriert sich hingegen auf den Markt der »Anlagen im Keller«. Ihr Heizgerät HXS 1000 Premiere soll derzeit seine Praxistauglichkeit erweisen. Seine Festoxid-Brennstoffzelle erzeugt maximal ein Kilowatt elektrischer Leistung. Geringere Materialkosten und Serienfertigung sollen die Marktreife Anfang 2005 bringen. Wettbewerbsfähige Kosten erwartet Sulzer Hexis aber erst gegen Ende des Jahrzehnts.

Der deutsche Konkurrent Vaillant favorisiert – wie die Automobilindustrie – die Brennstoffzelle mit Polymerelektrolyt (PEM), die bei deutlich geringeren Temperaturen arbeitet und daher im Winter die Hilfestellung eines konventionellen Erdgasbrenners braucht. Die Kosten pro Gerät sollen ab der Serienfertigung in 2005 10 000 bis 12 000 Euro betragen.

Über den RWE-Werbespot sind Unternehmen wie Vaillant nicht gerade glücklich, da er suggeriert, dass eine Brennstoffzelle schon morgen in den Regalen steht. Zu viel Publicity, darin sind sich die meisten Experten der Branche einig, wecke zu große und verfrühte Erwartungen. ◁

Norbert Aschenbrenner ist promovierter Chemiker und Wissenschaftsjournalist in München.

»Der deutsche Atomausstieg findet kaum Nachahmer«

Gert Maichel, Jurist und Agrarökonom, Präsident des Deutschen Atomforums und Vorstandsvorsitzender der RWE Power AG, sieht neue Chancen für die Kernkraft.

Spektrum der Wissenschaft: Im Jahr 2001 haben deutsche Kernkraftwerke 171,3 Milliarden Kilowattstunden Strom produziert – ein Rekord. Der beschlossene Ausstieg aus der Kernenergie zeigt wohl bislang noch keine Wirkung?

Dr. Gert Maichel: Es wurden keine festen Laufzeiten, sondern Reststrommengen festgeschrieben, und die lassen sich von einem Kraftwerk auf ein anderes übertragen. Geplant ist zunächst nur, Stade Mitte 2003 und Obrigheim bis November 2005 vom Netz zu nehmen. Nach dem heutigen Stand dürfte es in Deutschland noch weit über das Jahr 2020 hinaus Strom aus Kernenergie geben.

Spektrum: Wie viel Geld ist in Deutschland seit den 1950er Jahren in die Kernenergie geflossen, und haben sich die Ausgaben letztlich gelohnt?

Maichel: Die öffentliche Hand hat nach meinen Informationen bis 1998 rund 250 Millionen Euro für Forschungen zum Leichtwasserreaktor zur Verfügung gestellt. Die kommerzielle Stromerzeugung selbst ist jedoch – anders als etwa bei den erneuerbaren Energien – nicht subventioniert worden. Vielmehr leisteten die Betreiber selbst den größten Beitrag von mehreren Milliarden Euro. Da aber der Strom aus Kernenergie trotz höchster Sicherheitsstandards immer noch zu den wirtschaftlichsten Erzeugungsformen zählt, lohnt sich der Betrieb.

RWE

Der Agrarökonom Dr. Gert Maichel glaubt an die Zukunft der Kernspaltung und fordert eine Kurskorrektur.

Spektrum: Sie behaupten, dass es bei der Kernenergie Entwicklungspotenziale gibt, die sie zum nachhaltigsten Energieträger überhaupt machen kann. Wie begründen Sie das?

Maichel: Im Gegensatz zu Erdöl oder Erdgas, das wir aus wenigen und politisch instabilen Regionen importieren, ist Uranerz weltweit ausreichend verfügbar. Mit nur einem Kilogramm aufbereitetem Uran lassen sich in einem Leichtwasserreaktor heute 350 000 Kilowattstunden Strom erzeugen. Zum Vergleich: Ein Kilogramm Öl reicht nur für zwölf Kilowattstunden. Und durch den Betrieb der Kernkraftwerke werden der Erdatmosphäre weltweit rund 2,5 Milliarden Tonnen Kohlendioxid pro Jahr erspart.

Spektrum: Hat die Kernenergie also doch noch eine Zukunft?

Maichel: Der deutsche Alleingang beim Atomausstieg ist ideologisch motiviert und hat international kaum Nachahmer gefunden. Im Gegenteil: Innerhalb der letzten Dekade ist die weltweite Stromproduktion durch Kernenergie um ein Drittel gestiegen. Rund um den Globus befinden sich über 400 Kernkraftwerksblöcke in Betrieb und 33 Reaktoren in zwölf Ländern im Bau. Planungen für weitere Kraftwerke gibt es in den USA, Russland, China oder auch in Finnland, wo ein privater Energieversorger völlig ohne Subventionen ein neues Kernkraftwerk errichten will.

Spektrum: Gibt es denn innovative Konzepte in der Reaktortechnik, die eine Renaissance fördern könnten?

Maichel: Weltweit werden verschiedene Modelllinien verfolgt. In Europa zum ▷

▷ Beispiel der deutsch-französische Druckwasserreaktor EPR oder der in Deutschland entwickelte Siedewasserreaktor SWR 1000. Beides sind Weiterentwicklungen bewährter Leichtwasserreaktor-Linien mit höchstem Sicherheitsstandard. Darüber hinaus wird in zwei internationalen Studien ein breites Spektrum neuer Reaktorkonzepte diskutiert, die in zwanzig bis dreißig Jahren zum Tragen kommen könnten. Hier wird auch das Konzept des einst in Deutschland entwickelten gasgekühlten Hochtemperaturreaktors wieder aufgegriffen. In Modulbauweise wird dieser jetzt in China und Südafrika weiterentwickelt.

Spektrum: Was für Chancen geben Sie neuen Techniken zur Behandlung des Atommülls?

Maichel: Sie sprechen die Transmutation an, also die Elementumwandlung langlebiger Isotope in kurzlebigere. Ein solches Verfahren würde die Menge an hochradioaktiven Abfälle erheblich reduzieren. Denn die Langlebigkeit der künstlichen Elemente, die im Reaktor anfallen, kann so um den Faktor hundert verringert werden. Allerdings setzt das einen geschlossenen Brennstoffkreislauf mit fortentwickelter Wiederaufarbeitung voraus. Insgesamt bleibt derzeit noch ein großer Klärungsbedarf im Hinblick auf die Realisierbarkeit und die Finanzierung dieser Ideen.

Spektrum: Sie fordern weiteres Geld vom Staat für die Forschung. Wofür soll das ausgegeben werden?

Maichel: Es ist meines Erachtens ungemein wichtig, dass das kerntechnische Know-how Deutschlands nicht verloren geht. Schließlich sind unsere Sicherheitsphilosophie und unsere sehr hohen Standards weltweit anerkannt. Weitere Kürzungen der Budgets für Forschung und Lehre wären da absolut kontraproduktiv. Nur um das klarzustellen: Ich bin überzeugt, dass neue Technologien wie die Brennstoffzelle, aber auch regenerative Energien durchaus ihren Teil zur künftigen Stromversorgung beitragen werden. Doch wir werden auch dann nicht auf die großen Kraftwerke verzichten können, um unsere Grundversorgung zu sichern. Spätestens ab 2010 müssen in Deutschland rund 40 000 Megawatt an Kraftwerksleistung neu in Betrieb genommen werden, um die Altanlagen aus den 1960er Jahren zu ersetzen. Wir müssen dafür Sorge tragen, dass auch künftigen Generationen die Option Kernenergie offen bleibt. ◁

Interview: **Norbert Aschenbrenner**

INTERVIEW ZUR KERNSPALTUNG II

»Die Kernenergie ist nur begrenzt beherrschbar«

Der Diplom-Ingenieur Michael Sailer vom Öko-Institut e.V. , Gutachter in Sachen Kerntechnik und Vorsitzender der Reaktor-Sicherheitskommission des Bundesumweltministeriums, gibt der Kernspaltung keine Zukunft.

Spektrum der Wissenschaft: Trotz Ihrer negativen Einschätzung zur Atomkraft werben Sie für das Studienfach Kerntechnik. Wie passt das zusammen?

Michael Sailer: Auch wenn weltweit wohl nicht mehr viele Kernkraftwerke gebaut werden, müssen die bestehenden Anlagen in Deutschland noch bis zu zwanzig Jahren betrieben, abgerissen und samt Abfällen entsorgt werden. Das schafft Arbeit für eine Generation von Kerntechnikern.

Spektrum: Einige Energieversorger befürchten aber Versorgungslücken, wenn in zehn oder 15 Jahren alte Kernkraftwerke abgeschaltet werden müssen.

Sailer: Ich denke, die Vorstände, die in fünf oder zehn Jahren über die Investitionen zu entscheiden haben, sind sicher wenig gewillt, sich erneut für die Kerntechnik zu entscheiden. Die Unternehmen müssen nämlich am Anfang sehr viel Kapital reinstecken, und sie bekommen ihre Investitionen erst im Lauf von bis zu zwanzig Jahren zurück. Das ist sehr viel ungünstiger als bei anderen Formen der Energieerzeugung. Außerdem gibt es die öffentliche Diskussion mit allen Begleiterscheinungen.

Spektrum: Stichwort Sicherheit und Risikofaktor Mensch – halten Sie die Kernkraft für technisch beherrschbar?

Sailer: Das ist seit vielen Jahren mein Hauptbedenken. Es müssen bei dieser komplexen Technik ganz viele Einzelheiten stimmen, damit es nicht zur Katastrophe kommt. Auch bei modernen Reaktorkonzepten bleibt eine gewisse Wahrscheinlichkeit für schwer wiegende Unfälle. Beherrschbar – ja, aber nur begrenzt.

Spektrum: Zeichnet sich eine Lösung Standortfrage über ein Endlager ab?

Sailer: Bis Ende 2004 müssen die Spielregeln gesellschaftlich und politisch festgelegt werden, wie danach gesucht wird. Bis 2010 müssen dann zwei unterirdisch zu erkundende Standorte feststehen, von denen dann einige Jahre später der geeignetere ausgewählt wird.

ÖKOINSTITUT E.V.

Michael Sailer vom Öko-Institut warnt vor der unterschätzten Komplexität der Reaktortechnik.

Spektrum: Wie sicher kann ein solches Endlager sein?

Sailer: Das hängt von zwei Faktoren ab. Es muss gewährleistet sein, dass die geologische Entwicklung des Standorts für mindestens eine Million Jahre stabil verläuft. Außerdem muss das Bergwerk nach Ende der Einlagerung auch hermetisch verschlossen werden.

Spektrum: Im Zusammenhang mit Endlagerung wird viel über Transmutation diskutiert, die Umwandlung langlebiger Isotope in kurzlebige. Ist das eine denkbare Lösung für die Abfallproblematik?

Sailer: Es gibt derzeit keine Maschine, die das großtechnisch durchführen könnte. Das Grundproblem aber ist, dass es die Transmutation nicht schafft, hundert Prozent der langlebigen Isotope umzuwandeln, sondern eher fünfzig, Optimisten meinen achtzig Prozent. Man braucht also dennoch ein Endlager. Und in jedem Fall bedeutet das Verfahren einen zusätzlichen finanziellen Aufwand. ◁

Interview: **Norbert Aschenbrenner**

Immer noch ein Quäntchen besser

Mit allen Tricks erhöhen Ingenieure die Effizienz der Brennstoffnutzung konventioneller Kraftwerke.

Von Bernd Müller

Wie ein riesiger Öltanker liegt das Gebäude des RWE-Braunkohlekraftwerks Niederaußem in der Landschaft. 200 Meter reicht der weltgrößte Kühlturm in den Himmel. Drinnen ebenfalls nur Superlative: In der Halle rotiert die stärkste mit fossilen Brennstoffen befeuerte Dampfturbine der Welt mit einer Leistung von 950 Megawatt im Probebetrieb. Sie wird voraussichtlich einen Bruttowirkungsgrad von rund fünfzig Prozent erzielen. Das bedeutet, dass etwa die Hälfte der im Brennstoff enthaltenen Energie in Strom umgewandelt wird. Auch das ist ein Weltrekord.

Ein hoher Wirkungsgrad ist gleichbedeutend mit Ressourcenschonung und Schadstoffreduzierung. So setzt ein 500-Megawatt-Steinkohlekraftwerk heute beispielsweise 36 Prozent der chemischen Energie der Kohle in Strom um, ein Prozent mehr Effizienz würden den Brennstoffverbrauch um 16 000 Tonnen und den Kohlendioxidausstoß um 43 000 Tonnen pro Jahr senken.

Im Brennpunkt der Entwicklung stehen die Turbinen, also jene Bauteile, deren Schaufeln vom heißen Dampf in Rotation versetzt werden, einen Generator antreiben und so Wärmeenergie in Strom verwandeln. In der Anlage von Niederaußem sind es wahre Giganten, jede mehrere hundert Tonnen schwer. Hergestellt werden sie von Siemens Power Generation in Mülheim an der Ruhr. Rustikale Werkshallen täuschen darüber hinweg, dass die handtellergroßen bis armlangen Turbinenschaufeln auf Millimeterbruchteile gefertigt und mit entsprechender Präzision ineinander gefügt werden müssen. Moderne Fünfachsen-Fräsmaschinen zaubern bizarr geformte, dreidimensional gedrehte Hochleistungsschaufeln.

Gas und Dampf im Kombipack

Die ungewöhnliche Form ist das Ergebnis aufwendiger Computersimulationen. Die Ingenieure simulieren am Rechner die Strömung des Dampfes an jedem Punkt der Turbine und errechnen so die optimale Kontur der Schaufeln. Damit lassen sich dann Strömungsverluste minimieren und der Gesamtwirkungsgrad der verschiedenen Turbinenstufen maximieren. Dazu kommen diverse Tricks: So lassen dünne Lamellen zwischen Schaufelende und Gehäuse keinen Dampf ungenutzt entweichen. Ein isolierender Mantel garantiert zudem, dass sich das Turbinengehäuse beim Erhitzen gleichmäßig und rotationssymmetrisch verformt, denn schon geringste Abweichungen verringern den Wirkungsgrad.

Wer noch weiter an der Effizienzschraube drehen will, muss die Dampftemperatur erhöhen. Denn die Physik gibt vor: Je höher die Temperaturdifferenz zwischen einströmendem und ausströmendem Dampf, desto größer ist der Wirkungsgrad. In Niederaußem strömt der Dampf mit 600 Grad Celsius und einem Druck von knapp 300 Bar in die Hochdruckturbine. Das Problem: »Bei Temperaturen über 620 Grad Celsius wird es schwierig mit konventionellen Werkstoffen«, sagt Uwe Hoffstadt, bei Siemens für das Turbinendesign zuständig.

Im Projekt Komet 650, das Ende 2002 beendet wurde, suchten mehrere deutsche Firmen, darunter VEW Energie, RWE, Babcock, und etliche Uni-Institute deshalb nach Werkstoffen, die eine noch um fünfzig Grad höhere Dampftemperatur aushalten. Bewährt haben sich dabei vor allem Werkstoffe auf Nickelbasis. Im neuen europäischen Projekt AD700 haben sich die Teilnehmer nun bis zum Jahr 2010 sogar Dampftemperaturen von 720 Grad und einen Druck bis 350 Bar vorgenommen.

Die höchsten Wirkungsgrade erreichen zurzeit die erdgasbetriebenen kombinierten Gas- und Dampfturbinenkraftwerke (kurz: GuD), bei denen die Abwärme der Gasturbinen nicht verpufft, sondern zusätzlich zur Dampferzeugung und zum Antrieb einer Dampfturbine genutzt wird. Der Weltrekord liegt derzeit bei 58,4 Prozent, gehalten von Siemens im Kraftwerk Mainz-Wiesbaden. Ein großer Vorteil: Diese Kombikraftwerke emittieren nur ein Drittel der Kohlendioxidmenge, die ein ▷

SIEMAENS AG

Die räumliche Form der Schaufeln beeinflusst den Wirkungsgrad der Anlage entscheidend. Zu Hunderten montieren Fachleute millimetergenau gefertigte, handtellergroße bis armlange Turbinenschaufeln auf die Stahlachsen von Kraftwerksturbinen.

▷ Braunkohlekraftwerk gleicher Leistung ausstößt. Laut Hans-Joachim Ziesing, Leiter der Abteilung »Energie, Verkehr, Umwelt« beim Deutschen Institut für Wirtschaftsforschung in Berlin, sind GuD-Kraftwerke – möglichst in Kraft-Wärme-Kopplung ausgelegt – ideale Kandidaten für die Energieversorgung der nächsten Jahre und die Übergangsphase zur Energieversorgung aus regenerativen Quellen.

Die Gasturbinen in den GuD-Kraftwerken fordern die Werkstoffe am stärksten, denn das Gas strömt mit 1550 Grad Celsius in die Turbinen. Insbesondere müssen die sich drehenden Schaufeln neben der extremen Hitze noch enorme Fliehkräfte vom 10 000fachen der Erdbeschleunigung aushalten. Sie werden heute aus Einkristallen mit Nickelbasislegierungen gefertigt. Eine 0,3 bis 0,5 Millimeter dünne Keramikschicht aus Yttriumoxid oder Zirkonoxid schützt das Metall.

Doch diese Keramikschicht steuert höchstens 150 Grad zur Temperaturreduktion bei. Nun darf die Temperatur an der Metalloberfläche aber 950 Grad Celsius nicht übersteigen, denn nur zwanzig bis dreißig Grad mehr würde die Lebensdauer der Schaufeln halbieren. Deshalb strömt aus kleinen Löchern in den Schaufeln zusätzliche Luft zur Kühlung, die die Schaufeln wie ein Schleier umhüllt. Der Nachteil: Diese Art der Kühlung kostet leider Wirkungsgrad.

Hätte man einen Werkstoff, der 1550 Grad Celsius aushielte, wäre die Effizienz wesentlich höher und der Wirkungsgrad könnte theoretisch bis auf siebzig Prozent hochschnellen. Deshalb versuchen die Ingenieure Werkstoffe zu finden, die den hohen Verbrennungstemperaturen ohne Luftkühlung standhalten. In der engeren Wahl sind Siliziumnitride und -carbide, doch diese verbrennen mit der Zeit und brechen zu leicht. Der Traum der Turbinenkonstrukteure wären deshalb Schaufeln aus faserverstärkter Keramik, für die es aber noch keine geeigneten Fertigungsverfahren gibt.

Vier deutsche Hersteller von Gas- und Flugzeugturbinen sowie zwanzig Hochschulen haben sich zum Verbundforschungsprojekt AGTurbo zusammengeschlossen. Sie peilen einen Wirkungsgrad von 65 Prozent an, was nur durch eine Vielzahl von Maßnahmen zu erreichen ist. Die Projektpartner wollen zudem mit Kohle experimentieren, die durch Vergasung auch für GuD-Kraftwerke genutzt werden soll. Hier liegt das Ziel der AGTurbo bei 55 Prozent und damit höher als bei den besten Dampfturbinen.

Der Formel »heißere Gastemperatur gleich höherer Wirkungsgrad« sind allerdings Grenzen gesetzt. Bei 1550 Grad Celsius dürfte vermutlich Schluss sein, selbst wenn man noch hitzefestere Materialien fände. Der Grund: Bei so hohen Temperaturen steigt der Ausstoß von Stickoxiden rasant an, pro hundert Grad um den Faktor fünf. ◁

Der Physiker **Bernd Müller** arbeitet als Technik- und Wissenschaftsjournalist in Esslingen.

INTERVIEW

»In hundert Jahren benötigt Europa 200 Fusionskraftwerke«

Warum die Verschmelzung von Atomkernen nicht längst die Kernspaltung abgelöst hat, fragte »Spektrum der Wissenschaft« den renommierten Fusionsforscher Karl Lackner.

Spektrum der Wissenschaft: Was ist das für ein Gefühl, an einer Sache zu forschen, die man selbst wohl nicht mehr in Betrieb sehen wird?

Prof. Dr. Karl Lackner: Nicht anders als bei den Entwicklern, deren Raketen Jahrzehnte später zum Mond geflogen sind: Die Forschung an sich ist spannend, dauernd tauchen neue Fragen auf – Fusionsforschung macht einfach Spaß.

Spektrum: Es heißt schon seit Jahrzehnten, dass es noch fünfzig Jahre dauern wird, bis der erste Fusionsreaktor in Betrieb geht. Warum haben sich die Wissenschaftler so verschätzt?

Lackner: Am Anfang, in den 1960er Jahren, waren die Beteiligten furchtbar naiv. Sie glaubten, das heiße Plasma ließe sich relativ leicht in Magnetfeldern einschließen und von den Wänden fern halten. Aber man wusste fast nichts darüber und konnte mit den damaligen Computern nur wenig berechnen.

Spektrum: Was ist eigentlich ein Plasma?

Lackner: Ein Plasma besteht weitgehend aus ionisierten Atomen oder Molekülen und deren freien Elektronen, die wie in einem Gas umherfliegen. Die Fusionsforschung beschäftigt sich mit ionisiertem Wasserstoff. Gelingt es, dieses Plasma so weit aufzuheizen, dass die Kerne einander nahe genug kommen, um zu verschmelzen, läuft der Prozess mehr oder weniger von allein ab wie in der Sonne. Weil die Teilchen elektrisch geladen sind, lassen sie sich durch Magnetfelder auf bestimmte Bahnen bringen. Aber die ersten Aufbauten waren so kompliziert, dass erst heutige Computer in der Lage wären, ihr Verhalten zu berechnen. Dementsprechend gab es viele Rückschläge. Doch seit einigen Jahren wächst der kritische Parameter, das Produkt aus Dichte des Plasmas, Temperatur und Einschlusszeit, der für das Zustandekommen der Zündung ausschlaggebend ist. Er wächst sogar steiler als die Leistungs-

IPP

Karl Lackner ist Direktor am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) in Garching bei München. Er war bis vor kurzem Leiter des Europäischen Fusionsforschungsprojekts (EFDA). Lesen Sie auch seinen Beitrag »Der nächste Schritt zum Fusionskraftwerk« in Spektrum der Wissenschaft 6/2000, S. 86.

IPP

Ende dieses Jahres sollen alle organisatorischen Fragen für Iter geklärt sein, die Vorstufe zum ersten Demonstrationskraftwerk, das durch Kernfusion Strom erzeugen soll.

fähigkeit von Computern, die uns alljährlich schnellere Rechner beschert.

Spektrum: Die ersten Kraftwerke, die Strom ins Netz liefern können, soll es nun in 35 Jahren geben. Was gibt Ihnen die Sicherheit, dass diese Schätzung stimmt?

Lackner: Wir kennen die Physik nun sehr gut und wissen ziemlich genau, was noch getan werden muss. Sowohl von der Seite der Materialien her als auch von den technischen Aufbauten. Drei, vier Jahre brauchen wir für das Design eines Reaktors, fünf bis acht Jahre zum Bau und etwa acht Jahre, um die nötigen Ergebnisse zu liefern. Bis zum Energie liefernden Reaktor brauchen wir noch zwei derartige Generationen, die Abschätzung von 35 Jahren kommt also hin. Aber der Zeitrahmen hängt stark von der Politik ab. Zur Erinnerung: Allein drei, vier Jahre gingen schon bei der Standortsuche und ähnlichen Fragen für den derzeit größten Forschungsreaktor Jet verloren (Joint European Torus, *Red.*), der uns seit 1983 viele wichtige Ergebnisse gebracht hat.

Spektrum: Bleiben wir bei der Technik. Was macht sie so kompliziert?

Lackner: Wir haben ein heißes Plasma aus den schweren Wasserstoffisotopen Deuterium und Tritium, das bei Temperaturen von einigen hundert Millionen Grad – zehnmal mehr als im Sonneninneren – von Magneten eingeschlossen ist. Und das bei Wänden, die nur einige hundert Grad aushalten. Von den vielen technischen Ansätzen hat sich nun einer durchgesetzt, ein Plasma in einem toroidalen Ring. Die heute favorisierten Reaktortypen, Tokamak und Stellarator, nutzen beide dieses Prinzip. Nur dass der Tokamak einen elektrischen Strom im Plasma benötigt und der Stellarator nicht. Dieser braucht dafür aber einen wesentlich komplizierteren Aufbau der Magneten, um das Plasma in Form zu halten. Der Tokamak ist am weitesten fortgeschritten, und die Planungen der nächsten Reaktorgeneration basieren darauf.

Spektrum: Wie würde die Energieversorgung mit Fusionskraftwerken aussehen?

Lackner: Fusionskraftwerke eignen sich ideal für die Grundlast, auch in einem Verbund mit dezentralen Anlagen. Die Abwärme könnte zum Beispiel zur Produktion von Wasserstoff oder zum Heizen verwendet werden. Wir rechnen in unseren Szenarien damit, dass Europa im Jahr 2100 etwa 200 Fusionskraftwerke benötigt, mit je ein bis eineinhalb Gigawatt elektrischer Leistung. Sie würden etwa zwanzig Prozent des Stromverbrauchs abdecken.

Spektrum: Würde denn die Fusionstechnik die Probleme der Kernspaltung in Bezug auf Radioaktivität und Endlagerung lösen oder nicht eher neue erzeugen?

Lackner: Die Kernspaltung hat das Problem mit langlebigen radioaktiven Isotopen. Bei uns werden die stählernen Wände durch den Aufprall der Neutronen radioaktiv. Ein Endlager brauchen wir aber nicht, denn schon mit den heutigen Materialien könnte man hundert Jahre nach dem Abschalten einen neuen Reaktor bauen, denn dann ist die Radioaktivität weit genug abgeklungen. Darüber hinaus entwickeln wir keramische Werkstoffe aus Siliziumkarbid, die noch höhere Temperaturen aushalten. Die klingen sogar innerhalb von Stunden ab.

Spektrum: Wie ist der Stand bei Iter, dem internationalen Forschungsprojekt, das als Vorstufe für ein Demonstrationskraftwerk dient?

Lackner: Wir haben Standortvorschläge von Kanada, Japan, Spanien und Frankreich. Die USA haben sich Ende Januar bereit erklärt, nach vier Jahren wieder der internationalen Partnerschaft beizutreten. Auch China bietet eine Beteiligung von etwa zehn Prozent an, und Südkorea denkt darüber nach. Wir gehen davon aus, dass die technischen Verhandlungen einschließlich der Standortfrage, der Kostenverteilung und der organisatorischen Fragen bis Ende dieses Jahres abgeschlossen sind. Dann sind die nationalen Parlamente gefragt. Der Bau wird etwa 4,5 Milliarden Euro kosten.

Spektrum: Wie viel Geld ist bereits in die Fusionsforschung geflossen?

Lackner: Seit 1974 waren es weltweit 28,3 Milliarden Dollar, rund 1,1 Milliarden pro Jahr. Ob das viel ist, hängt davon ab, womit Sie es vergleichen.

Spektrum: Der deutsche Bergbau wird jährlich mit immerhin 3,5 Milliarden Euro subventioniert.

Lackner: Auch wenn Sie es mit anderen Ausgaben vergleichen, ist es eher wenig. Etwas zynisch: Der US-Verteidigungshaushalt dient ja zum Teil auch der Sicherung der Energieversorgung Amerikas, und der verschlingt jährlich mehr als 400 Milliarden Dollar.

Spektrum: Wenn einst ein Fusionsreaktor stehen sollte, was wird sein Strom kosten?

Lackner: Es gibt dazu zwar Studien, aber die Ergebnisse sind nur bedingt aussagefähig, weil die Rahmenbedingungen mit den heutigen schlecht zu vergleichen sind. Mit Vorsicht betrachtet, kommen die Kosten bei Fusionsreaktoren auf sechs bis sieben Cent pro Kilowattstunde. Möglich wären auch vier Cent. Auch das scheint hoch, eine Kilowattstunde aus Erdgas kostet heute weniger als zwei Cent. Aber wenn man die Kosten für die Entfernung von Kohlendioxid aus dem Abgas oder die Endlagerung von Spaltungsabfällen mit berücksichtigt, dann sind wir konkurrenzfähig oder sogar günstiger. ◁

Interview: **Norbert Aschenbrenner**

STRASSENVERKEHR

Maut ohne Mautstation

Ab August dieses Jahres sollen Lkws auf Autobahnen eine Gebühr bezahlen, die sich nach der zurückgelegten Strecke berechnet. Ein Fall für Satellitennavigation und Mobilfunk.

Von Matthias Scheffer

Rund 1,4 Millionen Lastkraftwagen, jeder mehr als zwölf Tonnen schwer, sind jedes Jahr auf deutschen Autobahnen unterwegs – mit steigender Tendenz. Etwa die Hälfte der Brummis stammt aus dem Ausland.

Schon lange fordern Experten, dass der Schwerlastverkehr stärker als bisher an der Instandhaltung der Straßen beteiligt werden sollte: Ein Lkw von vierzig Tonnen belastet die Verkehrswege 60 000-mal stärker als ein normaler Pkw. Was Umweltschützer zudem bemängeln: Bislang können Alternativen wie der Transport per Bahn preislich kaum mithalten, da selbst Fahrten mit nur teilweise ausgenutzter Ladekapazität bis hin zu Leerfahrten kaum zu Buche schlagen. Andererseits klagen Spediteurverbände, dass die 1995 eingeführte Vignette sie im internationalen Wettbewerb benachteilige: Da die Steuerlast hierzulande wesentlich höher sei, könne die ausländische Konkurrenz Transporte viel billiger anbieten.

Ende August dieses Jahres soll deshalb eine streckenbezogene Autobahngebühr für Fahrzeuge mit einem Gesamtgewicht von mehr als zwölf Tonnen eingeführt werden. Ihre Höhe soll – je nach Schadstoffemissionsklasse und Anzahl der Achsen – zwischen 0,10 und 0,17 Euro pro Kilometer betragen. Eine solche streckenabhängige Maut wird die Fahrzeugbetreiber dann teurer kommen als die derzeitige, zeitbezogene Vignette, wenn sie ihre Ladekapazitäten nicht besser nutzen.

Bis vor kurzem stand der August als Einführungstermin allerdings zur Disposition. Denn eines der beiden um Aufträge ringenden Konsortien fühlte sich benachteiligt und zog vor Gericht. Die Angelegenheit scheint geklärt: ETC, ein Zusammenschluss von DaimlerChrysler, Deutscher Telekom und dem französischen Autobahnbetreiber Cofiroute, hat den Zuschlag für das Mautsystem erhalten. AGES, ein Konsortium aus Vodafone, Shell, Aral und anderen Firmen, wird vor allem für das manuelle Einbuchungssystem zuständig sein und über das D2-Netz einen Teil der Datenübertragung abwickeln.

Eine mögliche Form automatisierter Mautsysteme kennen deutsche Autofahrer von Urlaubsfahrten durch Frankreich und Italien: Beim Auffahren auf eine der privatwirtschaftlich geführten Autobahnen passiert man eine erste Station und zieht aus einem Automaten ein Ticket. Vor dem Abfahren oder beim Wechsel in den Bereich eines anderen Betreibers erhebt eine zweite Station die Gebühr.

Um die Abfertigung zu beschleunigen, Personalkosten zu senken und letztlich auch den Zahlungsverkehr weiter zu vereinfachen, nutzen diese Länder moderne Kommunikationstechnik: An den Mautstationen kommunizieren Antennen über den Fahrstreifen mit einem so genannten Transponder im Fahrzeug. Diese Geräte, wie sie in ähnlicher Form seit langem in Flugzeugen eingesetzt werden, entsprechen elektronischen Etiketten: Sie erkennen die Funksignale der Mautstation und senden eine Kennung mit den Fahrzeugdaten zurück. Passiert das Fahrzeug die Einfahrstation, hinterlegt das Mautsystem einen Einfahrbeleg in digitaler Form. Am Ausfahrpunkt berechnet es die zurückgelegte Strecke und anhand der Kennung die fällige Gebühr. Diese wird entweder – wie für die Telefonrechnung üblich – angesammelt und regelmäßig vom Konto des Fahrzeugbesitzers eingezogen oder aber direkt von einer aufladbaren Chipkarte in der Transpondereinheit abgebucht.

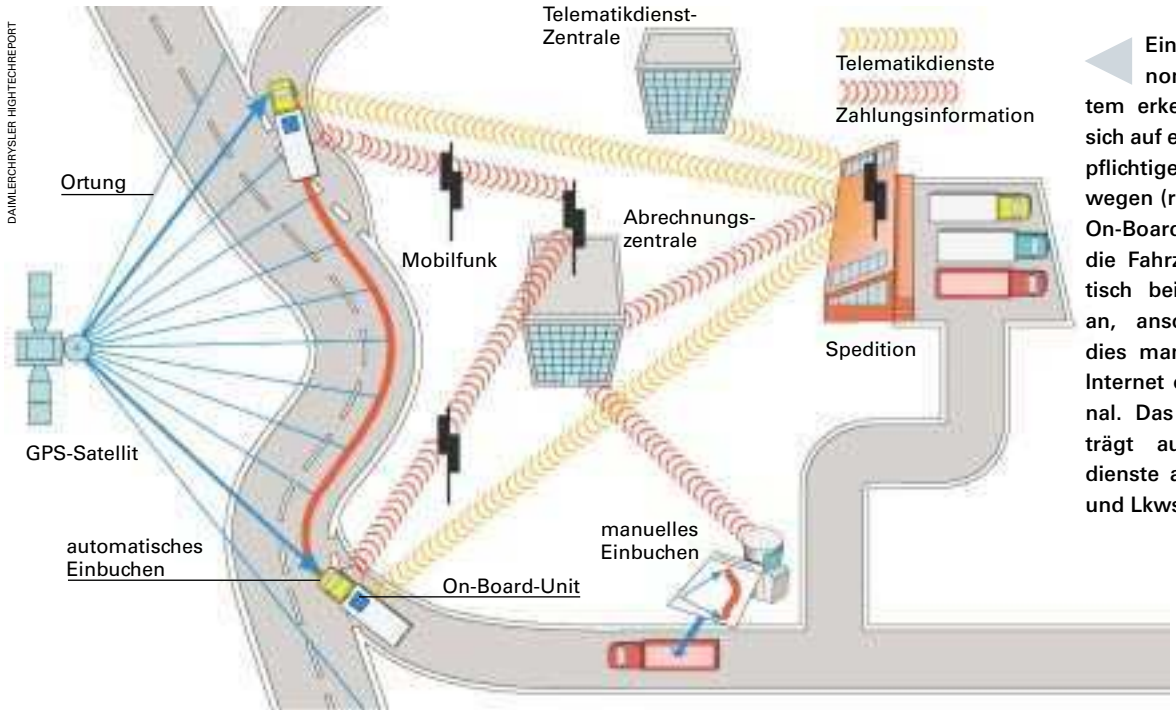
OBU zieht den Obulus ein

Für die Bundesrepublik eignet sich dieses Verfahren indes nicht, denn es setzt bestehende Mautstationen voraus. Sie nachträglich im Autobahnnetz einzurichten ist praktisch unmöglich. Die Alternative wären Portalrahmen, ähnlich den bereits vorhandenen Schilderbrücken, um darauf die erforderlichen Antennen zu montieren. Wegen der hohen Zahl an Zu- und Abfahrten im deutschen Autobahnnetz und der Vorgabe des Verkehrsministeriums, die Gebühr für jeden Autobahnabschnitt separat zu ermitteln, wären etwa 10 000 solcher Installationen erforderlich. Auch das erscheint nicht praktikabel.

Die Schweiz hat im Jahr 2001 für die Erhebung einer Schwerverkehrsabgabe eine Technik gewählt, die keine ortsfesten Anlagen benötigt. Sie soll in Deutschland ebenfalls zum Einsatz kommen: Statt mit elektronischen Etiketten wird ein Fahrzeug mit einer so genannten On-Board-Unit ▷

BEIDE FOTOS: TOLL COLLECT, BERLIN

Eine so genannte On-Board-Unit im Lkw von der Größe eines Autoradios ermittelt selbsttätig die im mautpflichtigen Autobahnnetz zurückgelegte Strecke (unten). Automatische Kontrollstellen überwachen die Einhaltung.



Ein fahrzeugautonomes Mautsystem erkennt Lkws, die sich auf einer gebührenpflichtigen Strecke bewegen (rote Linie). Eine On-Board-Unit meldet die Fahrzeuge automatisch bei der Zentrale an, ansonsten erfolgt dies manuell über das Internet oder ein Terminal. Das System überträgt auch Telematikdienste an Speditionen und Lkws.

(OBU) ausgestattet, die selbsttätig den im mautpflichtigen Netz zurückgelegten Weg anhand der Daten von Fahrtenschreiber, Bewegungssensoren und GPS-Empfänger ermittelt. Über eine Funkschnittstelle lässt sich dieses fahrzeugautonome Mautsystem beim Grenzübergang aktivieren beziehungsweise deaktivieren. In vorgegebenen Zeitabständen werden die in der OBU gespeicherten Informationen in eine Chipkarte ausgelesen und an die Abrechnungszentrale geschickt.

Fahrer ausländischer Lkws ohne eine solche OBU können sich beim Grenzübertritt an Terminals mittels Chipkarte an- und abmelden; dabei geben sie jeweils den aktuellen Kilometerstand ein. Diese Chipkarte speichert auch die Fahrzeugdaten. Das Terminal berechnet die Gebühr, die über Kredit- oder Tankkarte bezahlt wird.

Anders als in der Schweiz soll die Lkw-Maut in Deutschland nicht für das gesamte Straßennetz, sondern nur für Autobahnen erhoben werden. Das System muss also die verschiedenen Straßentypen unterscheiden. Das gewährleistet die satellitengestützte Fahrzeugnavigation. Die On-Board-Unit vergleicht die mit dem Global Positioning System (GPS) und diversen Sensoren bestimmten Positionsdaten mit den auf einem Speicherchip hinterlegten Koordinaten des Autobahnnetzes. Anhand der gespeicherten Längen einzelner Autobahnabschnitte ermittelt sie die Gebühren und hinterlegt eine elektronische Quittung für eventuelle Kontrollen. In regelmäßigen Intervallen sendet das Gerät die Summe der Einzelposten über ein integriertes Mobilfunkmodul an den Systembetreiber. Der stellt sie dem Nutzer in Rechnung.

Eine solche On-Board-Unit ist etwa so groß wie ein Autoradio und soll von lizenzierten Fachwerkstätten im Armaturenbrett oder im Hochdach des Lkws eingebaut werden. Eine hinter der Windschutzscheibe installierte Funkeinheit – und ein eigens etablierter Kommunikationsstandard – ermöglicht es den Fahrzeugen, auch stationäre Mautsysteme anderer europäischer Länder zu nutzen.

Keine Chance für Schwarzfahrer

Fahrzeuge ohne eine solche OBU müssen künftig unter Angabe der gewählten Route beim Systembetreiber angemeldet werden. Dies kann über das Internet erfolgen oder an speziellen Terminals, die an Raststätten oder Grenzübergängen installiert werden sollen. Registrierte Dauernutzer erhalten dazu eine Chipkarte.

Um Schwarzfahrern auf die Schliche zu kommen, errichten die Betreiber an stark befahrenen Autobahnabschnitten automatische Kontrollstellen mit Kameras und Infrarotsensoren. Anhand der Reflexionen eines Infrarotlasers erkennt eine solche Station die Abmessungen eines sich nähernden Fahrzeugs. Handelt es sich offenbar um einen Lkw, erfasst zudem eine Kamera dessen Front inklusive Kennzeichen. Verfügt der Wagen über eine On-Board-Unit, so werden seine Daten und die Quittung der letzten Mautabbuchung über eine Infrarotschnittstelle abgefragt; ihr Gegenstück befindet sich wie die Funkschnittstelle hinter der Windschutzscheibe. Weitere Sensoren bestimmen die Achsenzahl, um die Informationen der OBU zu überprüfen. Bleibt die Anfrage nach einer On-Board-Unit erfolglos, meldet die Station das Kennzeichen online an die Zentrale. Dort wird geprüft, ob der Fahrer durch Voreinbuchung berechtigt ist, diesen Abschnitt des Autobahnnetzes zu befahren. Mobile Kontrollen ergänzen das System, indem speziell ausgestattete Fahrzeuge während der Vorbeifahrt an Lkws deren OBU über die Infrarotschnittstelle abfragen beziehungsweise das Kennzeichen weitermelden. Konstatiert die Zentrale ein Mautvergehen, wird das Fahrzeug gestoppt oder der Fahrzeughalter anhand des Kennzeichens ermittelt und ein Gebührenbescheid ausgestellt.

Das Bundesverkehrsministerium rechnet derzeit mit jährlichen Einnahmen von etwa vier Milliarden Euro, wovon etwa 600 Millionen Euro pro Jahr für Aufbau und Betrieb des Mautsystems anfallen. Der übrige Betrag soll in die Infrastruktur investiert werden. Über das fahrzeugautonome Mautsystem sollen den Speditionen auch Telematikdienste angeboten werden, zum Beispiele zur Kontrolle ihrer Transportkette. Einige Staaten haben bereits Interesse an dieser Technologie bekundet.

Der Bauingenieur **Matthias Scheffer** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verkehrsforschung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt in Berlin.

www.wissenschaft-online.de

wissenschaft-online

Vier Buchstaben – A, T, G und C – bestimmen, dass aus einem Huhn wieder ein Huhn, aus einer Maus eine Maus und aus einem Menschen wieder ein Mensch entsteht. So einfach und doch so kompliziert ist das Alphabet des Lebens. Vor genau 50 Jahren haben James Watson und Francis Crick die Struktur der Erbsubstanz DNA beschrieben.

wissenschaft-online beschreibt die Hintergründe dieser Entdeckung, die als Meilenstein in die Wissenschaftsgeschichte einging. Lesen Sie im April unsere Speziale unter www.wissenschaft-online.de/dna.

50 Jahre später ist das Erbgut des Menschen nahezu vollständig entziffert. Prof. Dr. Hans Lehrach, führender Wissenschaftler der deutschen Genomforschung, sprach mit wissenschaft-online über Chancen und Risiken der modernen Genetik. Sie finden das Interview unter www.wissenschaft-online.de/interviews

www.wissenschaft-online.de

MEERESFORSCHUNG

Fischstäbchen im Aus

Deutschlands Speisefisch Nummer eins, der Kabeljau, ist aus kommerzieller Sicht vom Aussterben bedroht. Neben der Überfischung liegen die Ursachen in Klimaschwankungen und dem Räuber-Beute-Zyklus.

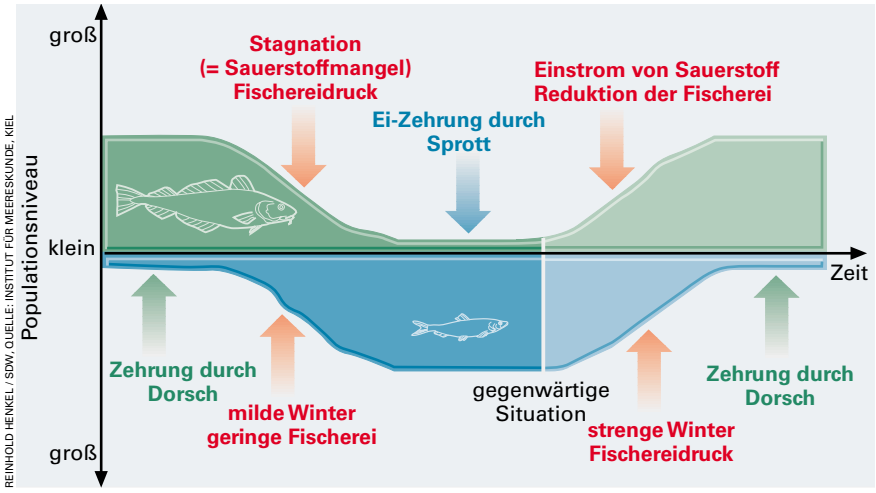
Von Nardine Löser

Die Überfischung der Meere ist an sich nichts Neues. Als aber kurz vor Weihnachten die Medien das Aussterben des Kabeljaus in der Nordsee verkündeten, stockte den Fischliebhabern und Feinschmeckern doch der Atem. Die Besorgnis erregenden Daten stammten von »Solea«, einem der drei Schiffe der Bundesforschungsanstalt für Fischerei: Gerade noch einen Jungkabeljau pro Stunde hatte das Grundschleppnetz an Deck geholt.

Seit über zwanzig Jahren, so lange läuft die Versuchsreihe bereits, war dies der niedrigste Wert für die fünf untersuchten Standardvergleichsflächen in der Deutschen Bucht. Demnach fehlt der Kabeljaunachwuchs aus dem letzten Jahr beinahe komplett. Schon seit langem sinkt der Bestand an Kabeljau enorm – in den letzten dreißig Jahren von 270 000 auf etwa 40 000 Tonnen. Sowohl für die Nordsee als auch für die Irische See und Gebiete westlich von Schottland empfahl der Internationale Rat für Meeresforschung (ICES) daher ab 2003 die Schließung der Kabeljaufischerei, da mit einer schnellen Erholung der angeschlagenen Bestände nicht zu rechnen sei.

Ein Fischbestand bricht nicht plötzlich zusammen. Wie also konnte es zu diesem dringenden Hilferuf kommen? Der ICES hatte in den Jahren zuvor einen Fang von jeweils 140 000 Tonnen Kabeljau empfohlen. Doch wirtschaftliche und industrielle Interessen wogen offenbar stärker. So wurden stattdessen zwischen 1977 und 1997 im Nordseebereich jährlich 203 000 Tonnen Kabeljau angelandet.

Bis heute ist die Fischerei stark subventioniert. Weltweit 36 Milliarden Euro fließen in die zahlreichen Fangflotten, deren Zahl weiter zunimmt. Die Hauptursache des Kabeljaurückgangs liegt laut WWF (World Wide Fund For Nature) an dem Umstand, dass Fische gefangen werden, bevor sie auch nur ein einziges Mal Nachkommen erzeugen können. Dabei gehören Kabeljaue – in der Ostsee auch Dorsch genannt – mit ihren gewaltigen Mengen an Eiern zu den fruchtbarsten Fischen überhaupt. Zu kleine Maschen der Netze und zu hohe Fangquoten tun dann ihr Übriges ▷



In der Ostsee ist der Bestand an Dorsch (grün) zugunsten der Sprotte (blau) stark zurückgegangen. Künftig könnte sich wieder ein stabiles Räuber-Beute-Verhältnis einstellen, wenn der Fischereidruck reduziert wird und sich die Umweltparameter wie Sauerstoff- und Salzgehalt erholen.

www.wissenschaft-online.de

▷ für den verbleibenden Nachwuchs. Zudem steigt der Bedarf an Fisch stetig – nicht nur wegen des Bevölkerungswachstums, sondern auch, weil Fisch eine beliebte Alternative zu Fleisch ist und neben Geflügel eine der typischen Ausweicharten in Zeiten von Schweine- und Rindfleischkrisen darstellt.

Früher galt der Nordseekabeljau bzw. der Ostseedorsch *(Gadus morhua)* als Deutschlands Speisefisch Nummer eins und wurde wegen seiner damals reichen Bestände in den 1980er Jahren sogar für die Produktion von Fischstäbchen verwendet. Der Umstieg auf Seelachs, Seehecht und dann auf Alaska-Seelachs waren erste Anzeichen für die Reduzierung der Bestände – aber leider für den Verbraucher kaum wahrnehmbar.

Die Überfischung der kommerziellen Fischbestände bedroht auch andere Gewässer: Im Nordatlantik befinden sich 62 Prozent, im Mittelmeer 65 Prozent und in der Ostsee 75 Prozent der Fischbestände außerhalb der biologischen Grenzen. Aus wissenschaftlicher Sicht bedeutet dies, dass zum Beispiel für den Kabeljau in der Nordsee 150 000 Tonnen geschlechtsreifer Tiere, der so genannte Laicherbestand, zur Sicherung notwendig wäre, also knapp das Dreifache der heutigen Bestandsmenge.

INTERVIEW

»Es muss sich wieder ein natürliches Räuber-Beute-System einstellen«

Dietrich Schnack, Direktor der Fischereibiologie am Institut für Meereskunde Kiel, plädiert für einen zeitweiligen Fangverzicht auf Ostseedorsch. Nur so könne sich dessen Bestand unter den gegebenen Bedingungen wieder erholen.

Dietrich Schnack

Spektrum der Wissenschaft: Herr Professor Schnack, die Fischereiforschung spricht von einem durch Sprotten dominierten System in der Ostsee. Warum will man dies verändern und dem Dorschbestand wieder Auftrieb verschaffen?

Professor Dietrich Schnack: Sprotten zählen zwar zu den wirtschaftlich genutzten Massenfischarten. Aber sie gelten nicht als attraktive Speisefische, sondern werden in erster Linie zu Fischmehl verarbeitet. Der Dorsch hingegen ist auf Grund seines Fleisches, seiner Größe und weniger unangenehmer Gräten viel gefragter. Nur ein gesicherter und gut wachsender Bestand an Dorschen sorgt für den Lebensunterhalt der Fischer. Zudem spielt die Balance der Fischarten für die Funktion des Ökosystems insgesamt eine große Rolle.

Spektrum: Wie kann der Dorschbestand gefördert werden?

Schnack: Dorsche halten sich als erwachsene Tiere in der Ostsee bevorzugt in bestimmten Tiefen auf. Denn nur dort, wo der Salzgehalt über elf Promille beträgt, können die Eier schweben, erfolgreich befruchtet werden und sich bei relativ konstanten Temperaturen entwickeln. Gegenwärtig ist aber in diesem Tiefenbereich die Sauerstoffversorgung besonders kritisch. Deshalb sind Wasseraustauschprozesse notwendig, verbunden mit einer massiven Verminderung des Fangdruckes. Nur wenn die Fischerei es schafft, sich auf die wechselnden natürlichen Bedingungen in der Ostsee einzustellen und ihre weit überhöhte Fangkapazität abzubauen, kann sich der Dorschbestand erholen und langfristig ertragreich sein.

Spektrum: Anfang des Jahres ist wieder verstärkt Nordseewasser in die Ostsee eingeströmt. Bedeutet das einen Schritt in die richtige Richtung?

Schnack: Einströme salzreicheren Wassers gibt es öfter. Aber nur besonders starke, bis in die zentralen Becken vordringende und vor allem regelmäßige Einstromsituationen können das Tiefenwasser der Ostsee ausreichend mit Sauerstoff versorgen. Ein kurzzeitiger Einstrom ist in der Regel innerhalb einer Saison wieder aufgebraucht, weil damit auch eine Nährstoffzufuhr in das Oberflächenwasser verbunden ist. Dies regt die Produktion von Phytoplankton an. Ein Großteil der Algen sinkt zu Boden und wird dort unter Sauerstoffverbrauch von Bakterien abgebaut. Für den Dorschbestand sind solche einmaligen Ereignisse daher meist ohne große Wirkung.

Spektrum: Könnte nicht auch ein Abfischen der Sprotten helfen?

Schnack: Das würde das Problem nicht lösen. Zwar würde der Fraßdruck auf die Eier des Dorsches vermindert, doch zugleich würde man diesem Bestand eine wichtige Nahrungsgrundlage entziehen. Das einzig Sinnvolle ist ein Fangverzicht auf Dorsche, damit sich wieder ein natürliches Räuber-Beute-System einstellen kann. Der Dorsch könnte dann selbst den Sprottenbestand reduzieren und seinen Reproduktionserfolg verbessern. Im Übrigen können auch kalte Winter zu einer Begrenzung des Sprottenbestandes beitragen. Die Kälte bleibt in mittleren Tiefen bis weit ins Jahr hinein erhalten und die Überlebensrate der Sprotteneier nimmt bereits unter vier Grad Celsius deutlich ab.

Spektrum: Sind Sie frustriert darüber, dass die Empfehlungen, die Fischerei auf Dorsch stark zu reduzieren und vorübergehend auch ganz einzustellen, kaum beachtet wurden?

Schnack: Ja. Den Wissenschaftlern wird häufig unterstellt, sie wären zu pessimistisch und ihre Aussagen unzuverlässig. Natürlich gibt es im Detail immer Unsicherheiten. Trotzdem besteht kein Zweifel, dass der Fischereiaufwand bei weitem zu hoch ist. Und die Fischerei ist sich darüber auch im Klaren. In der Diskussion zwischen allen Ostsee-Anrainerstaaten und in der Europäischen Union erweist es sich jedoch als außerordentlich schwierig, zu geeigneten Beschlüssen zu kommen.

Spektrum: Und der Verbraucher?

Schnack: Der Verbraucher kann kaum eingreifen. Da er die Produkte zumeist schon verarbeitet auf den Tisch bekommt, vermag er Fangort und Größe der Fische nicht nachzuvollziehen. Doch bei frischem Dorsch sollte er darauf achten, keine kleinen, aber auch keine ganz großen Exemplare zu kaufen. Wenn sich der Absatz der gegenwärtig überwiegend gefangenen kleinen Dorsche nicht mehr lohnt, könnte der Bestand eine ausreichende Schonung erfahren.

Das Interview führte **Nardine Löser**.

Nicht allein die Überfischung macht den Dorschartigen schwer zu schaffen. Klimaschwankungen und Räuber-Beute-Abhängigkeiten rufen ebenso erhebliche Veränderungen hinsichtlich der Bestandsstärke hervor. So zieht sich der Kabeljau mit zunehmender Erwärmung der Nordsee immer stärker in nördlichere Gebiete zurück. In der benachbarten Ostsee ist hingegen der Salzgehalt bestimmend. Vor allem die oft ausbleibenden Einströme salz- und sauerstoffhaltigeren Nordseewassers durch fehlende Nordwestwinde führen zur allmählichen Aussüßung des Brackwassermeeres. Davon sind besonders die Eier des Dorsches betroffen. Nach der Befruchtung verteilen sie sich entsprechend ihrer Dichte im Wasser. Ist der Salzgehalt und somit auch die Dichte sehr gering, sinkt der Laich auf den Meeresgrund und erstickt auf Grund des geringen Sauerstoffgehalts, oder wird von anderen Meeresbewohnern gefressen. Folge: weniger Nachwuchs und zurückgehende Bestände.

In direkter Abhängigkeit steht *Gadus morhua* in der Ostsee auch zu Hering und Sprott, die seine wichtigste Nahrungsquelle bilden. Ähnlich wie dem Dorsch behagt auch dem Hering der niedrige Salzgehalt der Ostsee nicht. Der Sprott hingegen konnte sich in den letzen Jahren stark vermehren, was sich nicht zwangsläufig als positiv für seinen Räuber herausstellt. Denn neben kleinen Krebstieren zählen Fischlarven und Eier, besonders die des Dorsches, zu den wichtigsten Energielieferanten der Sprotten. »Vorteilhaft« wirkte sich hier auch die Fischerei aus, da sie durch die Reduktion des Raubfischbestandes die Dominanz der Plankton zehrenden Fischarten, vor allem der Sprotten, verstärkte. Zu einer Art »Dorsch-Sprotten-Schaukel« entwickelt sich diese eigentlich stabile Räuber-Beute-Beziehung durch die komplizierte und nicht kalkulierbare Verknüpfung mit Klimaveränderungen und dem wechselnden Druck durch die Fischerei (siehe Grafik auf Seite 96). Der Fischereibiologe Dietrich Schnack, der mit Kollegen am Institut für Meereskunde in Kiel speziell das veränderliche System der Ostsee erforscht, plädiert dafür, diese verschiedenen Komponenten im marinen Gefüge zu berücksichtigen. Denn nur so könne eine nachhaltige Nutzung kommerzieller Fischbestände erreicht werden (siehe nebenstehendes Interview). ◁

Nardine Löser ist Fischereibiologin und Wissenschaftsjournalistin in Berlin.

KOMMENTAR

Der zweite Sündenfall

Die von wissenschaftlichen Fachjournalen beschlossene Selbstzensur schadet der Wissenschaft mehr als den Bioterroristen.

Chefredakteure und Herausgeber renommierter wissenschaftlicher Fachjournale haben sich einen Bio-Kodex zugelegt: Falls »der mögliche Schaden der Veröffentlichung … den Nutzen für die Gesellschaft [übersteigt]«, wenn also Terroristen die enthaltene Information zum Bau von Biowaffen missbrauchen könnten, sollen biowissenschaftliche Manuskripte künftig verändert oder gar nicht erst veröffentlicht werden. Das »Statement on the consideration of biodefence and biosecurity«, zu dessen 32 Autoren auch die Chefredakteure von »Science«, »Nature« und den »Proceedings of the National Academy of Sciences« zählen, wurde im Februar auf der Jahrestagung der American Association for the Advancement of Science verlesen.

Die Entscheidung zur Selbstzensur fiel nicht ganz freiwillig. Im Kampf gegen den Bioterrorismus sichern die USA schon seit längerem ihre ungeschützten Flanken. Seit Juni 2002 stellt ein US-Gesetz biologische Forschungslabors und Zehntausende von Wissenschaftlern unter rigorose Kontrolle. Jetzt erreicht der politische Druck auch die wissenschaftlichen Zeitschriften. Und reicht gar bis London: Im getreuen Großbritannien wollte – oder durfte – ihm nicht einmal »Nature« standhalten.

Dank der neuen Selbstverpflichtung müssten wir uns nun eigentlich sicherer fühlen. Doch sind es tatsächlich die allerneuesten Erkenntnisse der Biowissenschaften, deren missbräuchliche Anwendung uns Sorgen macht? Sind nicht längst genügend Materialien und Informationen im Umlauf, mit denen sich Angst und Schrecken verbreiten lässt? Und dringt wissenschaftliche Erkenntnis nicht auch durch viele andere Kanäle? Ohnehin erscheint der biologische Ernstfall vor allem als ein von US-Politikern lanciertes Szenario, das fast all unseren Erfahrungen mit terroristischen Anschlägen widerspricht. Die reale Gefahr kommt auf konventionellem Wege daher.

Ohnehin wäre ein funktionierender gutachterlicher (Zensur-)Prozess nicht von heute auf morgen zu haben. Und gesetzt den Fall, dass aus Unachtsamkeit das Kochrezept für die nächste biologische Attacke durch die gutachterlichen Finger schlüpft: Würden wir uns dann nicht fragen, warum wir gerade die Chefredakteure als letzte Instanz für die fallweise Verhinderung von Wissenschaft eingesetzt haben? Denn gerade sie stehen, so betonen die Initiatoren selbst, in der Pflicht, die freie Verfügbarkeit und Reproduzierbarkeit wissenschaftlicher Ergebnisse auch künftig zu gewährleisten. Diese Pflicht müssten sie, zumindest im Prinzip, selbst in kritischen Einzelfällen erfüllen. Nur wer über potenzielle Gefahrenquellen informiert ist, kann ihnen wirksam begegnen.

Ohnehin sind die Wissenschaftszeitschriften nicht die offene Flanke, durch die der (Terror-)Krieg über uns hereinbrechen wird. In den Bergen Afghanistans und anderen Terroristenverstecken werden weder das »Journal of Virology« noch Fachblätter für Bakteriologie gelesen. Wozu auch? Von 14 000 Manuskripten, die in den Jahren 2001 und 2002 bei den Publikationen der American Society for Microbiology eingingen, haben gerade einmal zwei »erhöhte Besorgnis« ausgelöst.

Der Druck auf die US-Biowissenschaftler hat sich in den vergangenen 18 Monaten sicherlich stark erhöht. Doch mit ihrer Bereitschaft zur Selbstzensur, die im Vergleich mit den staatlichen Maßnahmen ohnehin nur ein Tropfen auf den heißen Stein ist, erweisen die wissenschaftlichen Fachjournale der Wissenschaft keinen Gefallen. Ohne wirkliche Not und ohne überzeugendes Konzept haben sie erstmals seit dem Zweiten Weltkrieg wieder einen beunruhigenden Präzedenzfall geschaffen – wider die Freiheit der Wissenschaft und die der Presse.

Thilo Körkel

Der Autor ist Diplomphysiker und freier Wissenschaftsjournalist in Frankfurt am Main.

KLINIK FÜR PROSTATA-THERAPIE

Mit Ultraschall gegen Krebs

Seit etwa zehn Jahren wird die gutartige Vergrößerung der Prostata mit gebündelten Schallwellen behandelt. Der Heidelberger Urologe Joachim-Ernst Deuster hat dieses Verfahren nun gemeinsam mit dem amerikanischen Unternehmen Focus Surgery aus Indianapolis zu einer Therapieform gegen Prostata-Krebs weiterentwickelt.

Ultraschallköpfe erzeugen ihre akustischen Wellen jenseits einer Frequenz von zwanzig Kilohertz mittels piezoelektrischer Keramiken. Diese kristallinen Werkstoffe verändern ihre Abmessungen, wenn eine elektrische Spannung angelegt wird; bei einer hochfrequenten Wechselspannung beginnen sie dementsprechend zu schwingen. Es entstehen Schallwellen, die sich im Körper ausbreiten. Zur Bildgebung nutzt man die Reflexionen dieser Wellen an Gewebegrenzschichten, in der Therapie hingegen sollen die Schwingungen ein Höchstmaß an Energie in das Gewebe einbringen – allerdings begrenzt auf einen sehr engen Bereich und ohne das umliegende Gewebe zu verletzen. Beim *High Intensity Focused Ultrasound* (Hifu) sind die Sender konkav geformt, Hohlspiegeln vergleichbar. Von jedem Punkt ihrer Oberfläche gehen Elementarwellen aus, die sich in einem Brennpunkt überlagern. Erst dort entstehen dann so hohe Temperaturen, dass die Gewebe koagulieren.

Eine gutartige Vergrößerung der Prostata, im Volksmund als Männerleiden bezeichnet, befällt jeden zweiten Mann über fünfzig Jahre. Die Zerstörung des wuchernden Gewebes mittels Ultraschall bietet eine Alternative zur Hormonbehandlung oder Operation; in Deutschland wurden damit bislang etwa 1500 Patienten therapiert. Dieser Erfolg motivierte, das Verfahren auch auf das bösartige Prostata-Karzinom anzuwenden: Jedes Jahr erkranken daran in Deutschland 28 000 Männer. Joachim-Ernst Deuster schätzt, dass rund siebzig Prozent aller Patienten innerhalb von zehn Jahren nach der ersten Krebs-Diagnose an dem Tumor sterben.

Prostata im Brennpunkt

Bei einem Drittel der Patienten wird die Geschwulst per Operation entfernt, ein schwerer chirurgischer Eingriff, dem nicht nur ein mehrwöchiger Krankenhausaufenthalt folgt: Die Betroffenen müssen den Verlust ihrer Potenz verkraften, und jeder Zehnte leidet anschließend unter dauerhafter Inkontinenz. Ein weiteres Drittel, meist ältere Patienten, unterzieht sich einer hormonellen Behandlung. Die einzige Alternative bislang sind reiskorngroße, radioaktiv strahlende Partikel (fachlich *seeds*), die in die Prostata implantiert werden, um das Krebsgewebe von innen zu zerstören.

Dass es auch anders geht, versucht der Heidelberger Urologe in seiner Klinik für Prostata-Therapie unter Beweis zu stellen. Deuster, der sich als Vorreiter in Deutschland bei der Hifu-Therapie von gutartigen Prostata-Vergrößerungen sieht, lieferte das klinische Wissen, Focus Surgery entwickelte ein entsprechendes Gerät.

Dem Patienten wird bei leichter Narkose ein Tubus durch den Enddarm eingeführt, der einen Schallkopf mit zwei Sendern enthält. Im Wechsel erstellt dieser ein Ultraschallbild von der Prostata und beschallt dann mit fokussiertem Ultraschall. Die Bildinformationen werden aufbereitet, sodass der behandelnde Arzt den Zielbereich markieren kann, den der Schallkopf unter Beschuss nehmen soll. Ein Computer bestimmt danach Zahl und Positionen der dicht beieinander liegenden, streichholzkopfgroßen Brennpunkte.

Das Gerät verfügt über zwei Sender: Der eine arbeitet bei einer Frequenz von drei Megahertz (MHz), seine Pulse dringen zwei bis drei Zentimeter tief in das Gewebe ein, der zweite Sender mit vier MHz erreicht bis zu vier Zentimeter. Beide liegen sozusagen Rücken an Rücken, lassen sich im Tubus drehen und hin und her fahren. Auf diese Weise werden die Brennpunkte Millimeter für Millimeter durch das erkrankte Gewebe geführt. Erst dort entstehen dann Temperaturen von neunzig bis hundert Grad Celsius, während das durchstrahlte Gewebe kaum erwärmt wird. Auch der mit Wasser gekühlte Schallkopf bleibt etwa auf Körpertemperatur. Nach je-

In der Heidelberger Klinik für Prostata-Therapie wird erstmals in Deutschland mit hochfokussiertem Ultraschall Prostata-Krebs behandelt. Die Therapie erfolgt ambulant und hat keine medizinischen Nebenwirkungen.

ALLE FOTOS: M. BOECKH

Wichtigstes Element des gebündelten Ultraschalls zur Behandlung von Prostata-Krebs ist der Schallkopf. Er ist Ultraschallsensor zur Bildgebung und gleichzeitig Generator der energiereichen Schallwellen für die Therapie.

DAS UNTERNEHMEN IM PROFIL

Die Heidelberger **Klinik für Prostata-Therapie** ist eine Privatklinik unter der Leitung des Urologen Dr. Joachim-Ernst Deuster. Zur Behandlung gutartiger Prostatawucherungen setzen die Ärzte dort seit Jahren hochfokussierten Ultraschall ein, neuerdings auch in der Krebstherapie. Das System Sonablate 500 wird von dem US-amerikanischen Unternehmen **Focus Surgery** hergestellt, das sich auf minimalinvasive Chirurgie-Instrumente spezialisiert hat.
www.prostata-therapie.de

der Bestrahlung wird eine neue Aufnahme gemacht, um die eingestrahlte Energie gegebenenfalls nachzuregeln.

Die meist ambulante Therapie dauert je nach Größe der Behandlungszone eineinhalb bis zweieinhalb Stunden. Die Vorteile: Eine Operation entfällt, und eine dauerhafte Inkontinenz steht nicht zu befürchten. Da Gewebeteile der Prostata verbleiben, können die meisten Patienten damit rechnen, sogar ihre sexuelle Potenz zu erhalten.

Insgesamt etwa 2000 Karzinom-Patienten wurden weltweit bislang mit Hifu behandelt. Klinische Studien, die die Zuverlässigkeit der Methode untermauern sollen, laufen derzeit an mehreren Kliniken, zum Beispiel an der japanischen Kitasato-Universität in Tokio. In den USA wurden Studien gemäß den Anforderungen der Zulassungsbehörde Food and Drug Administration (FDA) vor kurzem abgeschlossen; die Ergebnisse werden demnächst veröffentlicht.

Ohne eine breite klinische Absicherung dürfte es noch eine Weile dauern, bis die Behandlungsalternative von den Kassen übernommen wird, derzeit bezahlen Hifu-Patienten etwa 8000 Euro. Überdies gibt es Einschränkungen: Prostata und Geschwulst sollten nicht größer als dreißig Kubikzentimeter sein und keine größeren Verkalkungen aufweisen, denn Kalk reflektiert den Ultraschall und mindert den Behandlungserfolg. Letztlich gilt auch hier wie bei jeder Art von Krebserkrankung: Je früher die Therapie einsetzt, desto größer ist die Chance auf einen Behandlungserfolg. ◁

Martin Boeckh

Der Autor studierte Physik und Geografie und lebt als Wissenschaftsjournalist in Heidelberg.

Spektrum der Wissenschaft
Zum Erfolg mit Online@dressen

➤ Aetherforschung
Neue Impulse für die Naturwissenschaften, und die Mathematik
www.aether-research.de

➤ Dipl.-Ing. Runald Meyer VDI
Entwicklung, Konstruktion
Technische Berechnung
Strömungsmechanik
www.etastern.de

➤ DOK – Düsseldorfer Optik-Kontor
Kontaktlinsen online bestellen
www.dok.de

➤ Eveni – the conference management solution
Wissenschaftliche Konferenzen effizient organisieren mit Internet-basierten Werkzeugen
http://eveni.com

➤ Forschungszentrum Jülich
Brennstoffzellen
Technologie, Jobs, Dissertationen, Diplomarbeiten
www.fuelcells.de/jobs

➤ Forum MedizinTechnik und Pharma in Bayern e.V.
Innovationen für die Medizin
www.forum-medtech-pharma.de

➤ PARA BioScience GmbH – We Are Immunology –
Immunologische Testungen, in vivo-in vitro. Präklinik. Antikörper auch durch Gensequenz
www.para-bioscience.com

➤ Prof. (apl.) Dr. Dr. habil. Harald Reiss
Controlling/upgrade F+E-Antrag/Projekt Patent-Einspruchsmaterial, Simulations
www.haraldreiss.de

➤ Spektrum Akademischer Verlag
www.spektrum-verlag.com

➤ Sterne und Weltraum Verlag
www.suw-online.de

➤ Wissenschaft Online GmbH
Wir machen Wissenschaft transparent!
www.wissenschaft-online.de

Hier können Sie den Leserinnen und Lesern von Spektrum der Wissenschaft Ihre WWW-Adresse mitteilen. Für € 80,00 pro Monat (zzgl. MwSt.) erhalten Sie einen maximal fünfzeiligen Eintrag bestehend aus einer Branchenzeile, Firmenname und WWW-Adresse. Zusätzlich erscheint Ihre Anzeige als Link-Eintrag auf der Internetseite von Spektrum der Wissenschaft.

Informationen erhalten Sie direkt von
GWP media-marketing
Anzeigenverkauf Spektrum der Wissenschaft • Mareike Grigo
Telefon (02 11) 887-23 94 • Telefax (02 11) 887-23 99
E-Mail: m.grigo@vhb.de

Mit der Veröffentlichung Ihrer WWW-Adresse im Heft und im Internetangebot von Spektrum der Wissenschaft erreichen Sie eine gehobene Zielgruppe und gewinnen für Ihre Online-Kommunikation hohe Aufmerksamkeitswerte.

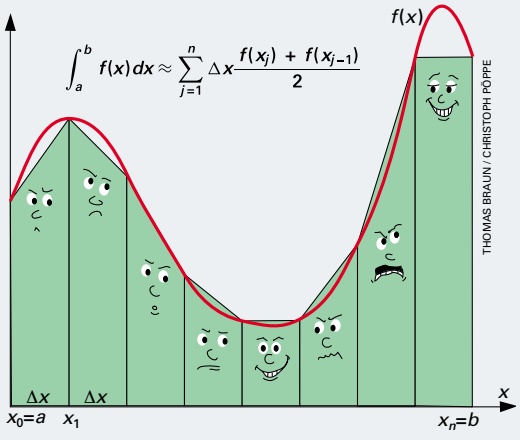
www.spektrum.de
Ihre Anlaufstelle für Wissenschaft im Internet

Ist jedes Rechteck ein Trapez?

Nein, sagt der normale Mensch. Ja, sagt der Mathematiker. Das ist vielleicht nicht normal – aber richtig.

Die Fernsehshow »Wer wird Millionär?« veranlasste Anfang Februar Millionen Zuschauer, längst verstaubte Erinnerungen aus der Schule wieder hervorzukramen. Was genau war die Definition von »Trapez«? Man schaut im Lexikon nach und findet (zum Beispiel bei Brockhaus und Meyer nahezu gleich lautend): »ein ebenes Viereck mit zwei parallelen, nicht gleich langen Seiten«. Dann ist ein Rechteck offensichtlich kein Trapez. Das hatten die Aufgabensteller von »Wer wird Millionär?« auch so gesehen und daraufhin auf die Frage »Jedes Rechteck ist ein …?« als eine der falschen Antwortmöglichkeiten »Trapez« angeboten. Die Raterin gab an dieser Stelle verunsichert das Spiel auf. Aber nach größeren Protesten sahen sich die Veranstalter veranlasst, die Frage zurückzuziehen und der Kandidatin das zu gewähren, was der Jurist »Wiedereinsetzung in den vorigen Stand« nennt.

Ein Rechteck ist nämlich insbesondere ein Trapez. Die Leute, die es wissen müssen, die Mathematiker, sind sich da ganz sicher. Das »Lexikon der Mathematik« (Spektrum Akademischer Verlag) spricht von einem »Viereck, in dem zwei gegenüberliegende Seiten parallel zueinander sind«, und es kommt eben nicht darauf an, ob die beiden Seiten gleich lang sind oder nicht.



Wie kommt ein so auffälliger Fehler in gleich mehrere, eigentlich zuverlässige Lexika? Weil die Lexikon-Redakteure normal denken. Dazu gehört es auch, eine Sache mit dem engsten Begriff zu benennen, der auf sie passt. Eine Lungenentzündung ist eine Infektion und geht mit Fieber einher. Sie als »fieberhaften Infekt« zu bezeichnen wäre zwar korrekt, aber verfehlt, weil es das Wesentliche einer Lungenentzündung nicht trifft.

Wer ein Rechteck als Trapez bezeichnet, gibt damit ebenfalls eine mangelhafte Beschreibung seines Objekts ab. Ein normaler Mensch verschweigt eben nicht das Wesentliche, zum Beispiel dass das vorliegende Viereck auch noch vier rechte Winkel hat.

Warum können die Mathematiker das nicht einsehen und mit ihrer Definition von »Trapez« auf die im »Brockhaus« konkretisierte Denkweise des vernünftigen Normalmenschen einschwenken? Weil das unzweckmäßig wäre.

Eine Gelegenheit, bei der Trapeze massenhaft Verwendung finden, ist die Integralrechnung. Man möchte den Inhalt der krummlinig begrenzten Fläche unter einer Kurve bestimmen. Dazu schneidet man die Fläche in dünne senkrechte Streifen und ersetzt die krumme Oberseite jedes Streifchens durch eine gerade Linie mit denselben Eckpunkten. Aus jedem Streifchen wird dadurch ein Trapez; dessen Flächeninhalt kann man mit der Flächenformel für Trapeze bestimmen und dann damit weiterrechnen.

Und was ist, wenn zufällig – oder absichtlich – die Oberkante des Streifchens genau waagerecht liegt, sodass aus dem Trapez ein Rechteck wird? Nichts ist. Die Flächenformel gilt für alle Trapeze. Wenn sich unter ihnen ein Rechteck findet, soll es bitte nicht so tun, als sei es etwas Besonderes. Es kommt in diesem Kontext nämlich gar nicht darauf an. Ganz im Gegenteil: Wenn man zwischen den Fällen Trapez und Rechteck unterscheiden müsste, dann wäre die Einführung in die Integralrechnung doppelt so mühsam; und das kann kein Mensch ernsthaft wollen. Also müssen die Mathematiker darauf bestehen, dass Rechtecke Trapeze sind.

Das ist der tiefere Grund, warum mathematische Begriffsbildungen manchmal so albern anmuten. Die Fachleute missachten häufig die gute Regel »Bezeichne ein Ding präzise und nenne seine wesentlichen Eigenschaften«, weil sie sich nicht auf die Frage einlassen wollen, was eine wesentliche Eigenschaft ist. Das weiß man nämlich nicht immer so genau; es ändert sich auch häufig im Verlauf der Untersuchung. Und warum soll man eigens über einen Spezialfall reden, wenn er genauso zu behandeln ist wie der allgemeine Fall?

Dass dabei dem herkömmlichen Sprachverständnis Gewalt angetan wird, daran muss man sich gewöhnen. Von einer »Menge« spricht ein normaler Mensch nur, wenn es etwas gibt, das zu der Menge gehört; die Mathematiker kultivieren ihre leere Menge. Nach einer »Transformation« sieht das Transformierte anders aus als zuvor, sollte man meinen. Falsch: Nichtstun ist ein – hoch geschätzter – Spezialfall einer Transformation. Eine »Kurve« ist etwas Krummes? Nicht notwendig. Definiert ist sie als der Weg eines Punktes, und der darf auch gerade sein.

Besonders bizarr: Es gibt Mathematiker, die »linear« als Spezialfall von »nichtlinear« ansehen, und das mit gutem Grund: Lineare Gleichungssysteme sind, grob gesprochen, regelmäßig und mit Standardmethoden lösbar, nichtlineare dagegen nur in besonderen Fällen und mit spezialisierten Verfahren. Wer ein solches Verfahren entwirft, möchte es auf eine möglichst große Klasse von Problemen anwenden können. Wenn es bei den leichten schon nicht funktioniert, wie soll es erst bei den schweren gehen? Also wendet man jedes Verfahren für nichtlineare Gleichungen zuerst probeweise auf den linearen Spezialfall an.

Mathematiker denken vielleicht nicht normal – aber richtig.

Christoph Pöppe

Der Autor ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

ANTHROPOLOGIE

P. J. Blumenthal

Kaspar Hausers Geschwister

Auf der Suche nach dem wilden Menschen

Deuticke, Wien 2003. 330 Seiten, € 24,90

Kaspar Hauser ist nur der prominenteste Mensch, der ohne Sozialisation durch Familie und Gesellschaft aufwuchs. Immer wieder einmal wird auch von anderen solchen Schicksalen berichtet; doch geraten sie schnell wieder in Vergessenheit. Wer hat sie je gezählt? Wie viele »Geschwister« hat Kaspar Hauser?

P. J. Blumenthal, Wissenschaftsjournalist und langjähriger Autor unter anderem bei »P.M.«, stellt in seinem Buch an die hundert Fälle von Menschenkindern vor, die allem Anschein nach ohne normalen Kontakt zu anderen Menschen aufwuchsen oder zumindest über längere Zeit lebten. In akribischer Recherche durchforstete er die alten Mythen und Fabeln; Berichte aus heutiger Zeit fanden ebenfalls Eingang in die Fallbeschreibungen. Heraus kam die bis jetzt wahrscheinlich vollständigste Sammlung von Geschichten über »wilde Menschen« – oder solche, die dafür gehalten wurden.

Lassen Sie sich von dem Vorwort nicht abschrecken! Das hohle Wortgeklingel von Elfriede Jelinek ist nicht repräsentativ für das Buch. Vielmehr zeigt Blumenthal, wie spannend und fesselnd die Darstellung menschlicher Schicksale auch in sachlicher Berichtsform sein kann. Umfangreiche Zitate aus den Originalquellen vermitteln so viel vom jeweiligen Zeitgeist, dass manche Urteile und Ereignisse aus der Vergangenheit dadurch plötzlich verständlich werden; die Anmerkungen Blumenthals geben weitere Hilfestellung und Erläuterung. An der sauberen, überaus fleißigen Quellenarbeit zeigt sich der gelernte Altphilologe.

Vielleicht waren viele dieser vorgeblich wilden Menschen gar nicht ohne Kontakt mit anderen Menschen aufgewachsen, sondern schlicht ausgesetzt worden oder verloren gegangen, weil sie unter Autismus, Schwachsinn oder einer anderen psychischen Erkrankung litten. Wer diese Menschen fand und sich um sie kümmerte, konnte sich dann ihr befremdliches Verhalten nicht anders als durch eine »wilde« Vergangenheit erklären.

Es gibt auch »moderne« wilde Menschen, bei denen es gelang, die Vergangenheit zumindest in groben Zügen aufzuklären. Auch hier stellt sich die Frage, inwieweit ihr Zustand durch eine geistige Schwäche zumindest mitbegründet war. So wurde 1970 in Los Angeles ein 13-jähriges Mädchen entdeckt, das noch nie sein verdunkeltes Zimmer verlassen hatte. Die Tage verbrachte »Genie«, wie sie später genannt wurde, fast bewegungslos gefesselt an ein Kindertöpfchen, die Nächte fest verschnürt in einem Schlafsack in einem vergitterten Kinderbett. Nach ihrer Befreiung wurde sie zu einem begehrten Forschungsobjekt; als sich jedoch keine neuen Erkenntnisse und Entwicklungsfortschritte mehr zeigten, verloren die meisten das Interesse an ihr. Sie geriet in Vergessenheit und wanderte zeitweise von Pflegestelle zu Pflegestelle. Nach vielen Auf und Abs lautete der letzte Kommentar über sie, »ein gestörter Mensch sei sie geblieben, doch immerhin munter …«. Bei Genie war im Alter von einem Jahr ein Kernikterus (Gehirnschädigung durch Bilirubin) diagnostiziert worden, wohl verursacht durch eine Rhesusfaktor-Unverträglichkeit zwischen Mutter und Kind. Auf diese Art geschädigte Kinder weisen im späteren Leben unterschiedlich schwere motorische und psychische Schäden auf. Wie sich Genie entwickelt hätte, wenn sich ihr normale Lebenschancen geboten hätten, wird man niemals wissen.

Der Psychologe Winthrop N. Kellogg zog 1931 das sieben Monate alte Schimpansenmädchen Gua gemeinsam mit seinem zehn Monate alten Sohn Donald auf, in der Erwartung, Gua werde sich dadurch menschliches Verhalten aneignen. Tatsächlich übernahm Donald mehr Verhaltensweisen von seiner Affenschwester als umgekehrt.

Das einzige veröffentlichte Bild von Genie nach ihrer Entdeckung 1970

Welchem Zweck dient nun diese Sammlung von tragischen Geschichten? Ist es einfach nur ein Kaleidoskop seltsamer und emotional bewegender Biografien? Nicht nur, aber doch in hohem Maße. Blumenthal referiert am Anfang des Buches die Gedanken und Theorien, die berühmte und weniger berühmte Persönlichkeiten zu dem Phänomen »wilde Menschen« geäußert haben. Schlussfolgerungen überlässt er aber dem Leser, der sich dank der Materialfülle immerhin fundierte eigene Gedanken machen kann.

Die romantische Vorstellung eines Jean-Jacques Rousseau, frei vom Einfluss der menschlichen Gesellschaft komme die wahre (gute?) Natur des Menschen zum Vorschein und der »wilde Mensch« könne dafür als Beispiel dienen, wird allein durch die Fallbeschreibungen als irrig entlarvt: Zur Natur des Menschen gehört die

menschliche Gesellschaft, und wer sie längere Zeit entbehren musste, ist in erster Linie ein schwer geschädigter Mensch.

Den Autor selbst bewegt die Frage, was den Menschen vom Tier unterscheidet und wo Parallelen zu finden sind. Von der Idee, die seine Untersuchung leitete, nämlich dass das Studium der wilden Menschen helfen könne, die Grenzen zwischen Mensch und Tier zu überbrücken oder wenigstens zu ergründen, nimmt Blumenthal am Schluss des Buches Abschied. »Man kann also getrost davon ausgehen, dass der *Homo ferus* in der Tat existiert, auch wenn er nur selten die strengen Kriterien der Wissenschaft auf Wiederholbarkeit ganz erfüllen wird. Ob er uns Auskunft geben kann über die Parallelen zwischen Mensch und Tier, ist aber zweifelhaft, auch wenn dies der tiefere Sinn unserer Studie sein soll.«

Was aber ganz zweifelsfrei für Blumenthal ist: Er hat ihn im Laufe seiner Untersuchungen zumindest dann und wann gefunden, den wahrhaft wilden Menschen.

Elke Reinecke

Die Rezensentin ist Redakteurin bei Wissenschaft Online in Heidelberg.

BIOLOGIE

John Medina

Am Tor zur Hölle

Die Biologie der sieben Todsünden

Aus dem Englischen von Jorunn Wissmann.
Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2002. 396 Seiten, € 24,95

Bei aller Komplexität wird unsere Reise letztlich doch unbefriedigend verlaufen«, schreibt der Autor und meint damit die Schwierigkeit, mit dem derzeitigen Wissensstand menschliches Verhalten auf zell- und molekularbiologische Grundlagen zurückzuführen. Unbefriedigt bin ich in der Tat, aber aus ganz anderen Gründen: Der interessant klingende Titel verspricht ein unterhaltsames, laut Klappentext »leicht lesbares« Sachbuch. Aber der ehemalige Professor der University of Washington in Seattle hat es bis zum Schluss nicht geschafft, sich zu entscheiden zwischen einem Lehrbuch der Molekularbiologie und einem Einblick in das Thema »für Literatur- und Politikwissenschaftler, für Geschäftsleute und für alle anderen …, die sich für Menschen interessieren, aber keine Biochemiker sind«. Herausgekommen ist ein Buch, das wegen seines provokanten Titels sicherlich viel gekauft, letztlich aber kaum gelesen im Bücherschrank verschwinden wird.

Dabei ist die Grundidee ausgesprochen gut. Aus dem unerschöpflichen Reservoir menschlicher Eigenschaften pickt Medina sich sieben heraus, die der mittelalterliche Dichter Dante in seinem Epos »Die göttliche Komödie« als Todsünden beschrieben hat: Hochmut, Neid, Zorn, Trägheit, Geiz, Völlerei und Wollust. Auf einer fiktiven Reise begegnet Dante in verschiedenen »Kreisen« Verstorbenen, die in passender Weise für ihre zu Lebzeiten begangenen Verfehlungen bestraft werden. Da es sich bei den Sündern häufig um reale Persönlichkeiten des 14. Jahrhunderts handelte, war »Die göttliche Komödie« damals ein politisch sehr brisantes Buch. Und aus heutiger Sicht zu untersuchen, welche biologischen Mechanismen für die missliche Lage von Dantes Zeitgenossen mitverantwortlich gewesen sein könnten, ist ein origineller Ansatz.

Medina kehrt die Reihenfolge Dantes um und beginnt die wissenschaftliche Betrachtung der Todsünden mit der Wollust – mit gutem Grund: Einerseits verkauft sich Sex immer gut, andererseits will Medinas Konzept ausgerechnet für die Todsünde, die Dante an erster Stelle nennt, nicht passen. Hochmut, Neid, Trägheit und Geiz sind aus biologischer Sicht schwer fassbar, weshalb Medina jedes Mal auf mehr oder minder geglückte Ersatzeigenschaften zurückgreift. Entsprechend verkrampft wirken viele Versuche, sie dennoch mit Dantes Beschreibungen zu verknüpfen.

Depressionen sind ein spannendes Forschungsgebiet – aber keine Todsünde

Mitunter geht der Thementausch völlig daneben. So springt Medina zwischen Hochmut, Selbstwahrnehmung und Selbstbewusstsein hin und her, als ob alles das Gleiche wäre. Und wo er anstelle des Neids einfach Depressionen beschreibt, weil die auf Neid zurückzuführen seien, wirken seine Argumente wenig überzeugend. Eigentlich wäre dieser Kraftakt auch gar nicht nötig, denn die Biologie der Depression ist durchaus ein spannendes Gebiet. Allerdings sollte man sich hüten, sie in den Mantel einer Todsünde zu zwängen.

Auch inhaltlich enttäuscht das Buch. Zwar sind die beschriebenen Fakten und ▷

Der Geiz, aus den »Sieben Todsünden« von Hieronymus Bosch (um 1450–1510), die auf diesem Gemälde im Kreis angeordnet sind

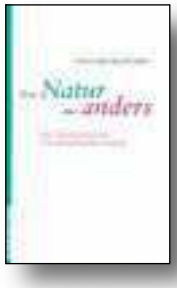
AKG BERLIN

▷ Modelle bis auf unwesentliche Kleinigkeiten korrekt, aber sobald der Molekularbiologe Medina im Reich der Gene angelangt ist, überhäuft er den Leser mit Fachbegriffen, die teilweise nicht erklärt werden, und kryptischen Abkürzungen für Gene, deren Namen sich ein Laie kaum merken kann und will. Da helfen auch die Anekdoten und Analogien aus dem Mittelalter nicht, die zudem häufig überflüssig sind und wiederum verkrampft wirken. Außerdem erweckt Medina so – all seinen anders lautenden Beteuerungen zum Trotz – den Eindruck, Verhalten sei vor allem auf das An- und Abschalten von Genen zurückzuführen.

Unter dem Strich bleibt ein Gefühl der Enttäuschung über ein mäßiges Buch mit einer eigentlich guten Idee. Wer etwas zur Biologie des Verhaltens erfahren möchte, ist mit einem Schulbuch der Oberstufe oder einem einführenden Lehrbuch jedenfalls besser beraten. »Ich verstehe kein Wort. Aber ich komme wieder«, zitiert Medina eine seiner Studentinnen. Ob der Leser dieses Buches nach ein, zwei Kapiteln wiederkommt, ist äußerst fraglich.

Olaf Fritsche

Der Rezensent ist promovierter Biologe und Wissenschaftsjournalist in Walldorf.



PSYCHOLOGIE

Doris Bischof-Köhler

Von Natur aus anders

Die Psychologie der Geschlechtsunterschiede

Kohlhammer, Stuttgart 2002. 430 Seiten, € 27,–

Die Erzieherinnen im Kindergarten haben gesagt, mein Sohn sei ein ziemlich wilder Junge. Einer, der rauft und seine Spielkameraden haut. Dabei habe ich von Anfang an darauf geachtet, mit ihm sanft umzugehen, viel zu kuscheln, ihm vorzulesen. Ich hätte wirklich nicht gedacht, dass er so ein Rabauke wird.« »Ich habe mal gelesen, dass Mädchen sich vor allem an ihren Müttern orientieren, wenn es um den Umgang mit Technik geht. Also habe ich darauf geachtet, mehr selber zu machen – und Glühbirnen gewechselt, den Ölstand geprüft. Genutzt hat es nichts. Meine Tochter interessiert sich einfach nicht für Technik. In der Schule hat sie jetzt Physik und Chemie abgewählt.«

Wer sich mit Müttern unterhält, hört oft solche Sätze. Eltern – vor allem die Mütter – machen sich heute viele Gedanken darüber, wie die Erziehung ihrer Kinder männliches oder weibliches Rollenverhalten beeinflusst. Eine einfache Frage ist das nicht. Denn einerseits hat sich bei der tatsächlichen Rollenverteilung in der Gesellschaft nicht viel getan: Immer noch sind Frauen in Führungspositionen dramatisch unterrepräsentiert. Die Zahl der Abiturientinnen, die sich für ein naturwissenschaftlich-technisches Studium entscheiden, steigt nur langsam. Immer noch verlangsamt sich die Karriere einer Frau entscheidend, wenn sie ein Kind bekommt. Andererseits war kaum etwas in den vergangenen fünfzig Jahren einem so starken Wechsel unterworfen wie die Vorstellungen von männlichen oder weiblichen Rollen. Während früher das Wort »Karrierefrau« einer üblen Beschimpfung gleichkam, gilt heute nur als »Powerfrau«, wer Job und Kinder zumindest theoretisch mit links wuppt.

Die Psychologin und Soziologin Doris Bischof-Köhler, die im Bereich Entwicklungspsychologie an den Universitäten Zürich und München lehrt und forscht, hat eine beeindruckende Menge an Material zusammengetragen. Das Werk, in das sowohl eigene Arbeiten als auch eine umfangreiche Literaturrecherche eingeflossen sind, gibt einen umfassenden Überblick über aktuelle Hypothesen und Erkenntnisse zum geschlechtsspezifischen Verhalten. Bischof-Köhler setzt sich darin kritisch mit öffentlich viel beachteten Theorien zur Entwicklung der Geschlechtsidentität auseinander und berichtet über Studien, die stereotype Vorstellungen über Verhalten und Entwicklung von Mädchen und Jungen bestätigen oder widerlegen.

Ein Beispiel: Zunächst mag es ein wenig wie Folklore klingen, dass Erwachsene sich fremden Kleinkindern fürsorglicher und sanfter näherten, wenn ihnen gesagt wurde, es handele sich um Mädchen, während sie vermeintliche Jungen zu mehr Aktivität ermunterten. Doch Studien, in denen Wissenschaftler Testpersonen einen geschlechtsneutral gekleideten, einige Monate alten Säugling präsentierten und sie aufforderten, mit diesem zu spielen, entdeckten hier einen wahren Kern. Erhielten die Erwachsenen die Information, es han- ▷

Die 5x5-Rezension des Monats von wissenschaft-online

Claudia Wassmann

Die Macht der Emotionen

Primus 2002, 166 Seiten, € 19,90

Es ist ein Genuss, sich von Claudia Wassmann durch die verschiedenen Bereiche führen zu lassen: von der Geschichte der Emotionsforschung bis hin zur Pathologie der Emotionen und ihrer Bedeutung für das Immunsystem. Emotionen sind faszinierende Untersuchungsobjekte – für alle mit Neurologie beschäftigten Forscher und Heiler, für Kognitionswissenschaftler ebenso wie für Soziologen, Philosophen, Literaturwissenschaftler, Erziehungswissenschaftler und Geistliche. Die Autorin hat viele Wissenschaftler aus diesen Fachgebieten besucht. So ist ein anregendes Kaleidoskop entstanden, in dem auch komplizierte Zusammenhänge einfach dargestellt sind. Claudia Wassmann gelingt, was viele vergeblich versuchen: ein guter, nahezu vollständiger Überblick über ein hochaktuelles Forschungsgebiet.

5x5 Rubriken	Punkte 1 • 2 • 3 • 4 • 5
Inhalt	■■■■■
Didaktik	■■■■■
Suchen/Finden	■■■■■
Lesespaß	■■■■
Preis/Leistung	■■■■
Gesamtpunktzahl	23

Lesen Sie die komplette Rezension von Markus Fendt im Internet unter
http://www.wissenschaft-online.de/5x5

Bildungsfutter und Lesespaß in einem!

Spektrum-Sachbücher

Jürgen Blunck (Hrsg.)

Wie die Teufel den Mond schwärzten

Die dunklen Flecken auf dem Mond, seine Veränderungen im Laufe eines Monats oder gar die seltenen Verfinsterungen bei Vollmond haben Menschen seit Urzeiten Rätsel aufgegeben. In den Mythen und Sagen vom Mond spiegeln sich vielfältige Versuche, die Mondbeobachtungen in einen sinnvollen Zusammenhang zu bringen - in Geschichten wie die von den *Teufeln, die den Mond schwärzten* ...

Ein Muss für alle Astro-Fans!

2003, 292 S., 26 Abb., geb.
€ 19,95, ISBN 3-8274-1409-1

Clifford Pickover

Die Mathematik und das Göttliche

Religion und Mathematik, Gott und Zahlen, Muster und Mythen - eine originelle Mischung, die der bekannte Wissenschaftsautor Clifford Pickover in diesem facettenreichen Buch zusammengestellt hat. Machen Sie sich gefasst auf eine abenteuerliche Achterbahnfahrt zwischen Wissenschaft und Fiktion, durch Raum und Zeit. Entdecken Sie die Mysterien der Mathematik und ihre jahrtausendealte Verbindung zu Philosophie, Astronomie, Aberglaube und Religion.

2003, 448 S., 108 Abb., br.
€ 14,95, ISBN 3-8274-1430-X

Lernen – wie funktioniert das?

Manfred Spitzer

Lernen

Wir lernen nicht nur in der Schule, sondern vor allem im Leben. Es geht nicht um Büffeln und Tests, sondern um Fähigkeiten und Fertigkeiten, die wir zum Leben brauchen. Lernen ist die natürliche und nicht zu bremsende Lieblingsbeschäftigung unseres Gehirns. Wie unsere „Lernmaschine im Kopf" arbeitet und wie wir sie mit Lernerfolg – und auch Vergnügen – arbeiten lassen können, das vermittelt dieses spannende Buch.

2002, 500 S., 93 Abb., geb.
€ 29,95 ISBN 3-8274-1396-6

NEU!

Susan A. Greenfield

Reiseführer Gehirn

Haben Sie Lust, auf eine Entdeckungsreise ins Innere Ihres Kopfes zu gehen? Möchten Sie erfahren, was dort oben passiert, wenn Sie sehen, hören, denken, fühlen oder handeln? Die Tour, die Ihnen die erfahrene Oxforder Professorin Susan Greenfield anbietet, ist auch für Anfänger geeignet und erfordert nur leichtes Gepäck.

Ein brillanter, kompakter Überblick über unser heutiges Wissen zum menschlichen Gehirn!

2003, 199 S., 12 Abb., br.
€ 9,95 ISBN 3-8274-1429-6

Der Farbtupfer im Bücherregal!

Norbert Welsch / Claus Chr. Liebmann

Farben

Ein faszinierend vielfältiges Panorama zum Thema Farben! Die Autoren erklären die naturwissenschaftlichen Phänomene klar und anschaulich, erläutern die Farbpsychologie und ihre Symbolik und erklären die Bedeutung von Farben in den Kulturen verschiedener Epochen und Länder.

2003, 420 S., 300 Abb., geb.
€ 49,95 ISBN 3-8274-1383-4

Durch vier Millionen Jahre Menschheitsgeschichte !

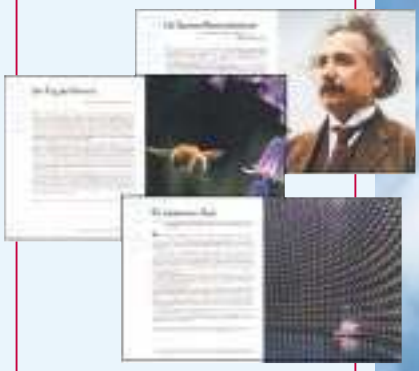
Gerd-Christian Weniger

Projekt Menschwerdung

Der Gegenwart unserer Vergangenheit ist das Kernthema dieses spannenden Buches. Welches biologische Erbe trägt der Mensch in sich? Kann er es überwinden? Ist die biologische Evolution schon längst abgelöst durch eine kulturelle Evolution ? Der Autor führt seine Leser durch vier Millionen Jahre Menschheitsgeschichte und liefert damit ein faszinierendes Panorama der Humanevolution. Ein echtes Lesevergnügen mit eigenwilligen Illustrationen von Wolf Erlbruch!

2003, 256 S., br.
€ 9,95, ISBN 3-8274-1425-3

Ein Meisterwerk!
Süddeutsche Zeitung



Peter Tallack (Hrsg.)

Meilensteine der Wissenschaft

Von den Ursprüngen des Zählens … bis zur Sequenz des menschlichen Genoms – in 250 Porträts entscheidender Ideen, Entdeckungen oder Erfindungen und ihrer Protagonisten veranschaulicht dieses Buch die Entwicklung der Wissenschaft von 35.000 vor Christus bis zum Jahr 2000: große wissenschaftliche Revolutionen und wegweisende Durchbrüche ebenso wie tastende Schritte und unvermeidliche Irrwege.

Das attraktive Bilderbuch und informative Nachschlagewerk in einem hat eine starke Sogkraft – wer einmal darin zu blättern anfängt, wird so bald nicht wieder aufhören wollen.

2002, 528 S., 314 Abb., geb.
€ 49,95 ISBN 3-8274-1380-X

Spektrum
AKADEMISCHER VERLAG

www.spektrum-verlag.de

Bestellen können Sie mit der Bestellkarte hinten im Heft ▸▸ tel. 07071/935369 ▸▸ per Fax: 07071/935393 ▸▸ Mail: shop@spektrum-verlag.de

Sämtliche Preise enthalten 7% Mwst

PREISRÄTSEL

Die Erleuchtung

mitgeteilt von Bernhard Reus

Im Gefängnis auf Alcatraz sind *n* Schwerverbrecher in Einzelhaft. Der Direktor bietet ihnen allen die Chance auf Freilassung, sofern sie sich als »kooperationsfähig« erweisen. Dazu wählt er jeden Tag einen von ihnen durch ein faires Zufallsexperiment aus: Jeder hat die gleiche Chance, ausgewählt zu werden, und die Auswahlen sind voneinander unabhängig. Insbesondere kann das Los mehrmals hintereinander denselben treffen.

Der Ausgewählte wird in einen Raum geschickt, der nichts enthält als eine Glühbirne an der Decke und einen Schalter, mit dem man sie ein- oder ausschalten kann. Der Gefangene darf fünf Minuten nachdenken und dann den Schalter betätigen oder auch nicht. Außerdem darf er, wenn er will, die Aussage treffen, dass alle *n* Gefangenen schon in dem Raum waren. Trifft die Aussage zu, kommen alle frei. Ist sie aber falsch, dann erlischt für alle Gefangenen die Chance auf vorzeitige Entlassung, und sie müssen für den Rest ihres traurigen Lebens die Gefängniskost genießen.

Zu Beginn ist die Glühbirne ausgeschaltet. Bevor der erste Häftling in den Raum gerufen wird, werden sämtliche Gefangenen für ein einziges Mal zusammengeführt und dürfen sich eine Stunde lang beraten. Danach gehen sie wieder in Einzelhaft.

Können die Gefangenen ihre Freilassung erreichen, und wenn ja, wie?

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir fünf Kugelschreiber »Pen Ultimate«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 15. April 2003, eingehen.

Lösung zu »Verschlüsselter Zugang« (Februar 2003)

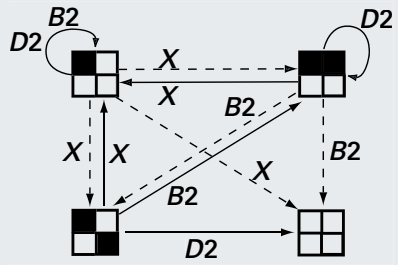
Die kürzeste Kombination, welche die Türe mit Sicherheit öffnet, ist *D*2; *B*2; *D*2; *B*1 (oder *D*1); *D*2; *B*2; *D*2.

Astrid Franz aus Hamburg, die Gewinnerin des Medienpakets »Brockhaus Naturwissenschaft und Technik«, fasste alle Stellungen der Schalter zu drei »Zuständen« zusammen:

- Ein Schalter steht anders als die drei anderen.
- Jeweils zwei benachbarte Schalter stehen gleich.
- Jeweils zwei über Eck benachbarte Schalter stehen gleich.

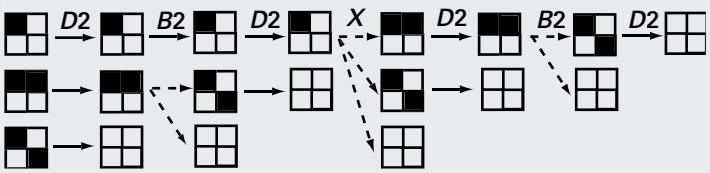
Die kleinen Grafiken zeigen nur eine von zwei bis acht Realisierungen jedes Zustands.

Die Einteilung vereinfacht das Problem; denn meistens macht eine Tastenkombination aus einem Zustand



wieder genau einen Zustand (durchgezogene Linien in der Grafik oben). Auf die Realisierung kommt es nicht an, mit Ausnahme zweier Fälle (gestrichelte Linien). Die Kombinationen *B*1 und *D*1 haben den gleichen Effekt und werden deshalb hier mit *X* bezeichnet.

Daraus lässt sich ein Vorgehen ableiten, das in kürzester Zeit sicher zum Ziel führt (unten).



Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

▷ dele sich um ein Mädchen, setzten sie dabei häufiger Puppen ein. Bei Babys, die als Jungen vorgestellt wurden, bevorzugte die Mehrheit der Testpersonen Autos – das tatsächliche Geschlecht des Säuglings spielte dabei keine Rolle.

Doch bereits einjährige Kinder steuern derartige Anregungen bewusst mit: Eine andere Untersuchung ergab, dass Jungen in diesem Alter deutlich weniger Interesse an Puppen als an Spielzeugautos zeigten, selbst wenn ihr Vater ihnen als Rollenvorbild den Umgang mit Mädchenspielzeug vorführte.

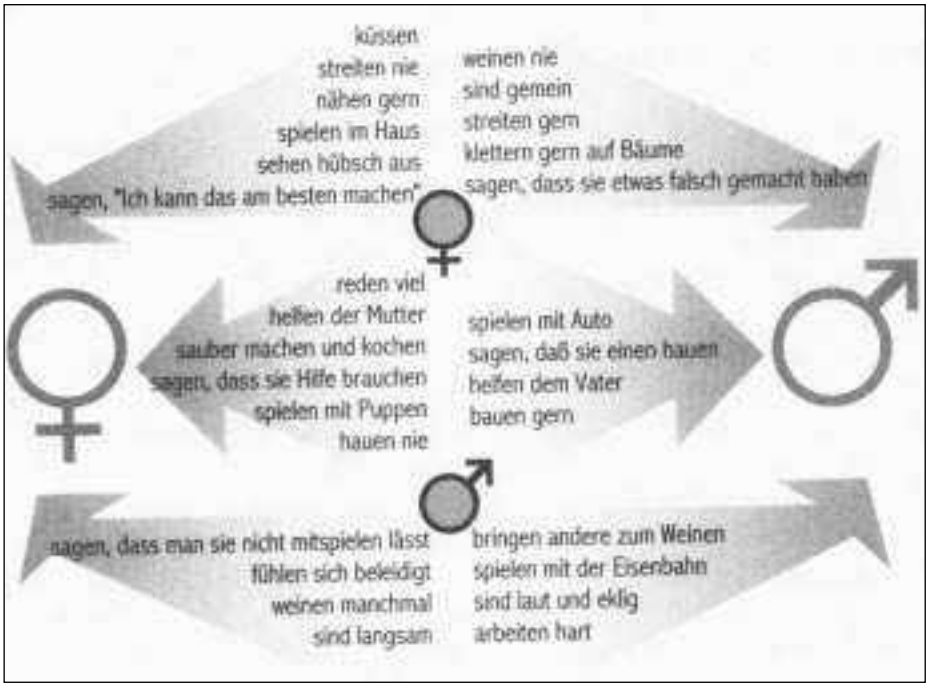
Die Entwicklung von geschlechtsspezifischem Verhalten ist ein interaktiver Prozess, der von vielen Faktoren gesteuert wird, erläutert Bischof-Köhler. Um diese im Einzelnen darzustellen, deckt sie eine große Menge an Aspekten aus den Fachbereichen Psychologie, Anthropologie, Biologie, Medizin und Soziologie ab. Neben der Analyse von väterlichen und mütterli-

»Meine Tochter interessiert sich einfach nicht für Technik«

chen Erziehungsstilen geht es in anderen Kapiteln unter anderem um Unterschiede zwischen männlicher und weiblicher Partnerwerbung, Geschlechtsrollen in unterschiedlichen Kulturen, die hormonelle Steuerung der Entwicklung und deren Störungen, Unterschiede bei verbalen oder visuell-räumlichen Fähigkeiten, Vor- und Nachteile der Koedukation, Selbstvertrauen und moralisches Bewusstsein.

Doris Bischof-Köhler beschreibt differenziert und erläutert in sachlichem Ton, sodass auch komplexe Zusammenhänge angemessen erörtert werden. Aus der Absicht, vor allem Informationen zu vermitteln und zu erklären, ist auch die ordentlich textlastige Gestaltung zu verstehen – mehr als 400 eng bedruckte Seiten ohne Fotos, allenfalls gelegentlich von Grafiken unterbrochen. Wer den sonst oft reißerischen Umgang mit Illustrationen bei diesem Thema gewöhnt ist, kann das durchaus als angenehm empfinden.

Etwas schwieriger wird es jedoch, wenn die Autorin sich nicht darauf beschränkt, Theorien zu diskutieren und wissenschaftliche Ergebnisse wiederzugeben, sondern diese Erkenntnisse auch subjektiv bewertet und außerdem noch in Bezug zur gesellschaftlichen Realität setzt. Bei der Vielzahl an Themen bleiben gerade diese an sich spannenden Teile relativ



Stereotype Ansichten über Mädchen (links) und Jungen (rechts), geäußert von Kindern im Vorschulalter: Mädchen (oben), Jungen (unten) und beiden gemeinsam (Mitte)

kurz und manchmal daher holzschnittartig. Dies gilt vor allem für die Ratschläge, die sie Frauen gibt, um Beruf und Familie zu vereinbaren: »Während der Familienphase sollte [die Frau] dafür Sorge tragen, nach Möglichkeit ein Bein in der Tür zu halten und vielleicht einmal wöchentlich in ihrem Beruf tätig zu werden, sodass ein Kompetenzeinbruch gar nicht eintritt.« Dieser beliebte Allgemeinplatz könnte so auch in einer der vielen Ratgeberkolumnen einer x-beliebigen Frauenzeitschrift zu lesen sein. Konkreter und hintergründiger wird Bischof-Köhler jedoch nicht, sie kommentiert auch nicht, dass derartige flexible Arbeitszeitregelungen derzeit hier zu Lande nur in recht wenigen Arbeitsfeldern ermöglicht werden.

Dies ist – vor allem, aber nicht nur – für weibliche Leser enttäuschend und ärgerlich, ebenso wie die Tatsache, dass in dem Buch hin und wieder ebenfalls eher pauschale Urteile verkündet werden, wie etwa: »Im Übrigen sehen die schwedischen Frauen ihre berufliche Selbstverwirklichung fast ausschließlich in Teilzeitjobs und nicht in einer eigentlichen Karriere.« Solche und ähnliche Sätze passen nicht in das sonst intelligent geschriebene und anspruchsvolle Buch. ◁

Silke Schieber

Die Rezensentin ist promovierte Medizinerin und Wissenschaftsredakteurin bei der Stuttgarter Zeitung.

Eine ungewöhnlich explosive Eruption des Ätna im November 2002

WWW.VULKANE.NET; FOTO: DANIELA SZCZEPANSKI

Schöne Katastrophen

Bilder von Vulkanausbrüchen erschrecken und faszinieren zugleich. Kein Wunder, dass zu diesem Thema im Internet unzählige Berichte und Fotos zu finden sind.

Von Elke Reinecke

Wo findet man im Internet einen Vulkanausbruch? Zum Beispiel unter www.vulkanausbruch.de. Die kleine Website, die der Internet-Verlag Turandot in Berlin betreibt, bietet einen einfachen und verständlichen Überblick über historische Ausbrüche und einiges mehr.

Weitaus reichhaltiger und wissenschaftlich anspruchsvoller ist www.stromboli.net, zu finden auf dem Server der ETH Zürich. Die Macher betreiben auf Stromboli eine automatische Messstation, und italienische Vulkane sind prominentes Thema, aber keineswegs das einzige; für eine – auch – deutschsprachige Website wird sogar überraschend reichhaltiges Material geboten. Besonders beeindruckend ist die Vielfalt und Schönheit der Bilder.

Es findet sich auch ein Verzeichnis zahlreicher Webcams, die Vulkane in aller Welt bei ihrer Aktivität (oder eben Inaktivität) beobachten (und deren Bilder ganz ohne Kreditkarte verfügbar sind); außerdem kann der Benutzer die Flugbahnen ausgeworfener Gesteinsbrocken simulieren, und für Lehrer stehen einige Unterrichtsmaterialien online zur Verfügung. Allerdings stehen die Zusätze und Berichte manchmal etwas vereinsamt herum. Da fehlt noch Struktur und Substanz. Für ihr erklärtes Ziel, vor allem den Erdkundeunterricht zu bereichern und zu fördern, müssen die Autoren noch einiges tun.

Dieses Stadium haben die amerikanischen Kollegen von der University of North Dakota größtenteils hinter sich. Unter »Volcano World« (http://volcano.und.nodak.edu) finden sich nicht nur Online-Lektionen und Lehreinheiten, sondern auch zahlreiche Anleitungen für Basteleien und Experimente. Wer sich seinen eigenen Vulkan herstellen möchte, hat sogar die Auswahl zwischen diversen Varianten: von elektrischen Vulkanen, die schon einiges an physikalischem Hintergrund erfordern, bis zu Modellen, für die außer Lehm nichts vonnöten ist. Kinder, Jugendliche oder Erwachsene finden hier fast alles, was man über Vulkane online stellen kann. So wird das Durchstöbern der Seiten zu einer echten Entdeckungsreise.

Die Initiatoren selbst bezeichnen ihre Seiten als »erste Quelle für Informationen über Vulkane im Internet«, und dies entspricht wohl den Tatsachen. Nicht nur die Breite und die anregende Aufbereitung des Stoffes erfreuen den Nutzer, sondern auch die Fülle an Fakten. Das Verzeichnis von Volcano World enthält fast 600 Einträge, fast alle mit weiterführendem Material wie Fotos, Satellitenaufnahmen, Karten, Beschreibungen von Eruptionen oder anderem. Und wem die ganze Erde zu klein ist, dem kann auch geholfen werden. Reisen zu den Vulkanen auf Mond, Mars, Venus und dem Jupitermond Io sind bei Volcano World inbegriffen.

Bloß: Für so entlegene und dann auch noch erloschene Vulkane wie den Vogelsberg und die Eifelmaare reicht die Vollständigkeit dieses amerikanischen Verzeichnisses denn doch nicht. Hier hilft eine weitere kleine deutsche Seite namens www.vulkane.net. Vor allem die Panoramabilder sind sehenswert. ◁

WWW.STROMBOLI.NET / SCIARA0203; FOTOS: MARCO FULLE

Linkes Bild: Aktivität des Stromboli am 19. Dezember 2002, kurz vor dem jüngsten großen Ausbruch. Während der mittlere Schlot des Nordost-Kraters minutenlang ausbricht (rechts), pafft ein kleinerer Schlot Dampfringe aus (links oben). Wenige Tage später (rechtes Bild) steigt eine mächtige Dampfwolke auf, wo der Lavastrom sich ins Meer ergießt.

CORBIS

Beim »Fosbury Flop« taucht der Schwerpunkt des Körpers wenige Zentimeter unter der Latte durch.

KINETIK

Flöhe, Käfer und Leichtathleten

Beim Hochspringen wird zuvor gespeicherte elastische Energie in Bewegungsenergie verwandelt. Dafür steht nur sehr wenig Zeit zur Verfügung, dann nimmt die Schwerkraft wieder überhand.

Von Wolfgang Bürger

Schwerkraft: Moderne Ingenieurkunst hat uns in zwei Schritten von den Fesseln der Schwerkraft befreit. Seit hundert Jahren verstehen wir, mit künstlichen Flügeln in einem Auftriebswirbel der Luft schwebend zu reisen, wie wir es bei Möwen und anderen Vögeln beobachten und vorher nicht verstanden. In den letzten fünfzig Jahren haben wir dazu gelernt, mit Raumschiffen auf ballistischen Bahnen durch einen fast leeren Weltraum zu segeln. Solche Reisen sind nur mit großem Energieaufwand möglich. Das Springen aus eigener Kraft nimmt sich dagegen sehr bescheiden aus, wie eine veraltete Technik. Die Schwerkraft hält uns flügellose Lebewesen an der Erdoberfläche fest und lässt uns nur für Sekunden und mit allergrößter Anstrengung im Sprung das Gefühl der Schwerelosigkeit erleben.

Um den zähen Kampf um die Zentimeter beim Hochsprung fürs Fernsehen attraktiver zu machen, könnte man Wettbewerbe auf dem Mond veranstalten, wo die Sportler bei der verminderten Schwerkraft das Siebenfache irdischer Sprunghöhen erreichen könnten – nicht im Raumanzug, sondern in sportlicher Kleidung in großen Lufthallen von 15 Meter Höhe, damit sich niemand beim Springen am Dach stößt. Das würde eine Kleinigkeit kosten, deshalb zurück auf die Erde!

Ein Mensch der Normgröße 1,80 Meter muss seinen Schwerpunkt aus der Standhöhe von durchschnittlich einem Meter (55 Prozent der Körpergröße) um einen weiteren Meter »überhöhen«, um die Latte bei 2 Metern zu überspringen. Das erfordert eine Absprunggeschwindigkeit von ungefähr 16 Stundenkilometern. Wollte er in eine Umlaufbahn um die Erde kommen, müsste er mehr als 1800-mal so schnell abspringen. Darin zeigen sich die Größenordnungen.

Nach Ansicht von Anthropologen ist die trainierte Federkraft des Sprungbeins die wichtigste Voraussetzung erfolgreichen Hochsprungs. Die mit dieser Sprungfeder erreichbare Schwerpunktsüberhöhung ist konstitutionell begrenzt und durch Training nicht beliebig zu steigern. Langbeinige Hochspringer mit unverhältnismäßig kurzem Oberkörper, die man in den Wettkämpfen beobachtet, haben anlagebedingte Vorteile. Mit Rücksicht auf kleinwüchsige Sportler wären deshalb Größenklassen beim Hochsprung ähnlich sinnvoll wie Gewichtsklassen beim Ringen und Boxen.

Sprung: Zur Vorbereitung des Absprungs wird die »Sprungfeder« gespannt. Das gilt für einen menschlichen Springer, der in die Hocke geht und die Beinmuskeln spannt, ebenso wie für einen mechanischen Hüpfer, dessen Schraubenfeder oder Federbein zusammengestaucht und gegebenenfalls mit einem Saugnapf am Fuß befestigt wird. Ab dem Zeitpunkt des Absprungs, zu dem sich die Füße oder der Fuß vom Boden lösen, stützt die Unterlage den Springer oder Hüpfer nicht mehr, und auf seinen Körper wirkt nur noch die Schwerkraft, die ihn mit g = 9,81 Meter pro Sekunde zum Quadrat nach unten beschleunigt. Schon in der ersten Sekunde nach dem Start vermindert sie seine anfängliche Aufwärtsgeschwindigkeit um die Geschwindigkeit der schnellsten Sprinter der Welt, um knapp 10 Meter in der Sekunde oder 36 Stundenkilometer. Da der Aufwärtsimpuls so rasch aufgezehrt wird, kommt es für den Springer vor allem darauf an, seinem Körper zum Zeitpunkt des Absprungs einen großen »Vorrat« an Geschwindigkeit zu verschaffen. Das tut er in der Beschleunigungsphase vor dem Absprung im Kontakt mit dem Boden durch die Dehnung seiner Sprungfeder. Dafür bleiben ihm höchstens zwei Zehntelsekunden Zeit, in denen er sein Sprungbein explosiv streckt und vom Boden abstößt. Die Reaktionskraft des Bodens erreicht dabei kurzzeitig ein Vielfaches des Körpergewichts.

Im Freiflug nach dem Absprung hat der Springer keinerlei Einfluss mehr auf die Bewegung seines Schwerpunkts; er kann auch den Gesamt-Drehimpuls seines Körpers nicht mehr verändern. Der Schwerpunkt ist kein materieller Punkt des Körpers, sondern wandert bei Veränderungen der Körperhaltung; dabei kann er auch außerhalb des Körpers geraten. Im Raum bewegt er sich wie ein Massenpunkt, in dem die Gesamtmasse des Körpers vereinigt zu denken ist, unter dem Einfluss der wirkenden Kräfte. Deren einzige ist beim Springen das Gewicht, während der Luftwiderstand bei der großen Massendichte des menschlichen Körpers vernachlässigt werden kann.

Im Gegensatz zu Vorstellungen, die in den Köpfen einiger Sportsachverständiger herumspuken, kann der Springer seinem Körper nach dem Abheben vom Boden keine Beschleunigung mehr erteilen. Wie auch? Er hat ja keine Raketen, mit denen er sein Tempo ohne Bodenkontakt erhöhen könnte. Anders wäre es, wenn das Reglement den Springern erlauben würde, Gewichte in die Hände zu nehmen und sie im Sprung nach hinten oder unten wegzuschleudern. Englische Leichtathleten sollen Ende des 19. Jahrhunderts auf diese Weise mehr als 13,50 Meter weit gesprungen sein.

Mechanische Leistung: Wie auch immer sich einzelne Körperteile im Sprung bewegen – der Schwerpunkt zeichnet in eine

senkrechte Ebene eine Wurfparabel, die nach den Gesetzen der Mechanik durch die Geschwindigkeit beim Absprung festgelegt ist. Der Springer versucht intuitiv, diese Parabel so einzurichten, dass ihr Scheitel nahe bei der Latte liegt. Bei fast allen Sprungtechniken wandert der Körperschwerpunkt mindestens fünf Zentimeter über die Latte hinweg, ausgenommen beim »Fosbury Flop«, bei dem der Springer die Latte rücklings überquert und den Körper so eng an die Latte schmiegt, dass der Schwerpunkt bis zu zehn Zentimeter darunter durchschlüpfen kann. Sportler behaupten (aber es ist kaum zu glauben), dass ein entsprechender Energiegewinn beim Hechtsprung vorwärts über die Latte nicht zu erzielen sei.

Um eine Schwerpunktsüberhöhung von $h = 1$ Meter zu erreichen, muss der Springer durch die Federkraft seines Sprungbeins eine Anfangs-Aufwärtsgeschwindigkeit von $v_0 = \sqrt{2gh} = 4{,}4$ Meter pro Sekunde (16 Stundenkilometer) erzielen. Hochspringer nehmen zwar auch Anlauf, können aber nicht wie Stabhochspringer horizontalen Anlaufimpuls in vertikalen Sprungimpuls umlenken. Offensichtlich ist das Bein nicht gleichzeitig als steifer »Sprungstab« und weiche »Sprungfeder« brauchbar.

Die mechanische Leistung eines Hochspringers ist gewaltig. Ein Leichtathlet von der Masse $m = 80$ Kilogramm, der sich in der Zeit $T = 0{,}2$ Sekunden zu einem Zweimetersprung ($h = 1$ Meter) beschleunigt, bringt kurzzeitig die Leistung $P = mgh/T = 3{,}9$ Kilowatt oder 5,3 PS auf. Von Rekordspringern werden Kurzzeit-Leistungen bis zu 9 Kilowatt (12 PS) berichtet. Bei einem Zweimetersprung ist der Sportler ungefähr die Zeit $t = 2\sqrt{2h/g} = 0{,}9$ Sekunden in der Luft, bis der Schwerpunkt jenseits der Latte wieder auf die Absprunghöhe gefallen ist. Beim Abflugwinkel $\alpha = 65°$ (Erfahrungswert) beträgt die Vorwärtsgeschwindigkeit in diesem Sprung $u = v_0 \cot\alpha = 2{,}1$ Meter pro Sekunde (7,5 Stundenkilometer) und die Weite $s = ut = 1{,}9$ Meter.

Angesichts der Begrenztheit sportlicher Leistungsfähigkeit wird im Hochsprung die Steigerung der Sprunghöhe Zentimeter um Zentimeter zum Wettkampf der Techniken. Hochreißen der Arme und Hochschwingen des freien Beines beim Absprung vergrößern den Kraftstoß des Bodens und damit die Sprunghöhe. Um die Latte zu überqueren, kommen Leichtathleten auch beim Hochsprung nicht ohne Anlauf aus, aber eine mäßige Dauerlaufgeschwindigkeit von 2 Meter pro Sekunde würde für die zum Überqueren der Latte ▷

Physik des Hochsprungs

Mit Federkraft gegen die Erdenschwere

Für den Antrieb der Sprünge von Käfern, Flöhen und Spielzeug-Hüpfern mit ihren unterschiedlichen Sprungtechniken – ausgenommen die kleinen Hüpfer aus dem Kindermuseum in Hiroshima – wähle ich als einfachstes Modell die Entspannung einer (gestauchten oder gespannten) mechanischen Feder mit dem linearen Kraftgesetz $K(x) = kx$ (x ist die aktuelle Auslenkung der Feder). Die Steifigkeit k der Feder, ihre maximale Auslenkung ℓ sowie die Masse m des Springers charakterisieren die wichtigsten Eigenschaften der beim Sprung benutzten Gliedmaßen.

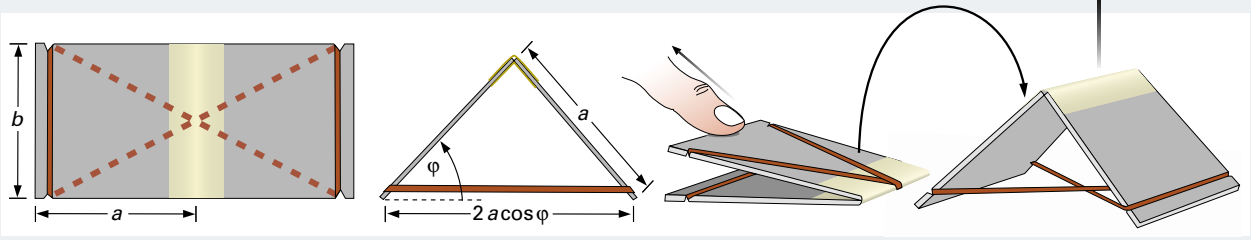
Absprung und Freiflug: Wir nehmen an, dass bei der Beschleunigung des Springers durch die elastische Feder keine Energie verloren geht. Die elastische Energie $k\ell^2/2$ der gespannten Feder geht bei völliger Entspannung in die kinetische Energie $mv_0^2/2$ des Springers über. Die Startgeschwindigkeit des Springers ist also $v_0 = \sqrt{k/m}\,\ell$. (Auf dem Federweg der Länge ℓ wurde das Gewicht des Springers gegen die – für große Sprünge – im Mittel sehr viel größere Federkraft vernachlässigt.) Durch Gleichsetzen der Startenergie $mv_0^2/2$ mit der im Aufstieg im Schwerefeld gewonnenen potenziellen Energie mgh ergibt sich die Aufstiegshöhe $h = v_0^2/(2g) = k\ell^2/(2mg)$.

Zeitdauer und Beschleunigung: Die Feder entspannt sich in der Zeit T, die ein schwingfähiger Mechanismus der Masse m bei der Federsteifigkeit k für eine Viertelschwingung $(\pi/2)$ benötigt: $T = (\pi/2)\sqrt{m/k} = (\pi/2)\ell/v_0$. Für die Belastung im Sprung sind die auftretenden Beschleunigungen maßgebend. Die größte Beschleunigung tritt während der Startphase auf und lässt sich im zeitlichen Mittel durch

$$\frac{v_0}{T} = \frac{2}{\pi}\frac{v_0^2}{\ell}$$

abschätzen. Durch Malnehmen mit der Masse folgt daraus die durchschnittliche Kraft auf den Schwerpunkt.

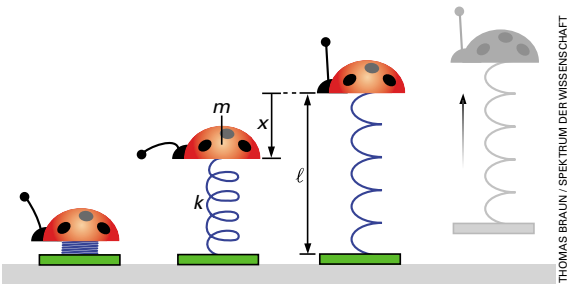
Zum Hiroshima-Hüpfer: In der Startphase ist seine potenzielle Energie V in guter Näherung nur die Energie des gespannten Gummibandes, $V = 2k(a\cos\varphi)^2$ (die Auslenkung des Gummibandes ist proportional der Öffnungsweite $2a\cos\varphi$; k ist die Federkonstante nicht des Gummibandes, sondern des Gesamtsystems). Die ursprünglich vorhandene Energie $V = 2ka^2$ wird umgesetzt in potenzielle Energie zur Hebung des Schwerpunkts (dieser Anteil ist in der Startphase vernachlässigbar) sowie die Rotationsenergie $K = m(ad\varphi/dt)^2/6$ der beiden Flügel. Aus der Energieerhaltung ($K + V = 2ka^2$) folgt die Bewegungsgleichung $d\varphi/dt = \sqrt{12k/m}\sin\varphi$. Während der Startphase hat der Schwerpunkt die Höhe $z = (a/2)\sin\varphi$ über der Tischfläche. Seine Beschleunigung in vertikaler Richtung ist $d^2z/dt^2 = (6ka/m)\sin\varphi\cos 2\varphi$. Sie wird bei $\varphi = 45°$ null, bei diesem Winkel hebt der Hüpfer ab. Die anfänglich im Gummiband gespeicherte Energie kommt nur teilweise dem Aufstieg zugute. Die nach dem Abheben in den Drehungen verbliebene Restenergie wird beim Zusammenschlagen der beiden Flügel in einem unelastischen Stoß verbraucht.



THOMAS BRAUN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

▷ erforderliche Weite von etwa 2 Metern genügen. Warum steigern dann namhafte Hochspringer ihre Geschwindigkeit vor dem Absprung bis zu 7 Meter pro Sekunde (25 Stundenkilometer oder 100 Meter in 14,3 Sekunden), die bei einer Flugdauer von 0,9 Sekunden der Weite $s = 6{,}30$ Meter entspricht? Tatsächlich wird die Anlaufgeschwindigkeit im allerletzten Schritt stark gebremst. Der horizontale Bremsimpuls dient der Einleitung der Körperdrehung, die für die optimale Sprungform benötigt wird. Dieselbe Drehung ließe sich zwar auch durch einen exzentrischen Abstoß des Körpers nach oben erreichen, aber es wäre Energieverschwendung, von der zur Aufwärtsbeschleunigung des Schwerpunkts nötigen Arbeit des Sprungbeins einen Teil zum Antrieb der Drehung abzuzweigen.

Spielzeughüpfer: Sein Sprungbein ist eine Schraubenfeder mit linearem Kraftgesetz (Federlänge $l = 4$ cm). Aus der beobachteten Sprunghöhe $h = 1{,}3$ m errechnet man die Absprunggeschwindigkeit $v_0 = 5{,}1$ m/s, auf die der Hüpfer sich vor dem Abheben in der Zeit $T = 0{,}01$ s beschleunigt. Die durchschnittliche Beschleunigung berechnet man daraus zu 41 g (41fache Erdbeschleunigung). Sie ist so groß wie bei einem gefährlichen Fahrzeug-Zusammmenstoß.



THOMAS BRAUN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

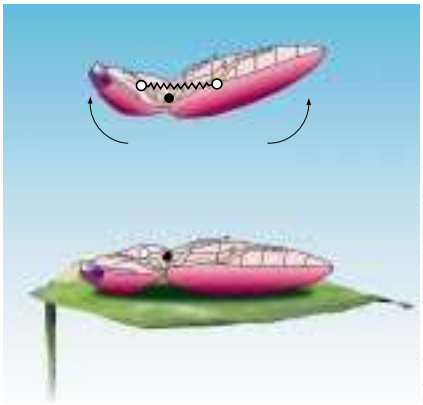
Der Spielzeughüpfer bezieht seine Energie aus der Entspannung einer gestauchten Feder.

Der Floh bringt die Energie zum Strecken seiner langen Beine (links) beim Absprung durch imposante Sprungmuskeln (rechts) auf.

KAGE / MEDICALPICTURE

STEFAN GARBE

Der Schnellkäfer kann aus der Rückenlage urplötzlich Kopf und Hinterleib bauchwärts knicken. Dadurch schlägt sein »Genick« auf dem Untergrund auf, und der Rückstoß schnellt das ganze Tier in die Höhe.



THOMAS BRAUN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Floh: Mit seiner Länge $l = 1{,}5$ mm ist er viel kleiner als der Spielzeug-Hüpfer und kann doch $h = 20$ cm hoch springen, weit über das Hundertfache seiner Körpergröße. Bei der (gemessenen) Absprunggeschwindigkeit $v_0 = 2$ m/s errechnet sich für den winzigen Springer eine Zeit T von etwa einer Millisekunde, während der er einer durchschnittlichen Beschleunigung von 178 g ausgesetzt ist. Da das Tier sicherlich mehr Zeit braucht, um die Energie für einen so gewaltigen Sprung bereitzustellen, nehmen Biologen an, dass es im Muskel Energie zum Sprung speichern kann. Das erklärt aber nicht, wie es die enormen Spannungen beim Absprung aushält.

Schnellkäfer und »Hiroshima-Hüpfer«: Schnellkäfer können Kopfschild und Hinterleib blitzschnell mit einer Muskelfeder zusammenziehen und sich dabei aus der Rückenlage bis zur Höhe $h = 30$ cm hochkatapultieren. Fast die gleiche Technik verwendet ein Hüpfer, den ich als leicht selbst zu bauendes Spielzeug im Wissenschafts- und Kulturmuseum für Kinder unweit des Friedens-Gedächtnisparks in Hiroshima entdeckte. Zwei Stücke festen Kartons werden mit flexiblem Klebeband anstatt eines Scharniers verbunden. Von den Einkerbungen an den vier Ecken aus wird ein Haushaltsgummiring (oder – für höhere Sprünge – deren zwei oder drei) straff gespannt. In Hiroshima gab es dazu fertige Pappen von $a = 7$ cm Länge und $b = 5$ cm Breite zu Gummiringen von 4 cm Durchmesser. Außerdem lagen lange Papierbänder bereit, die die Kinder in der Mitte am Gelenk als Schwanz ankleben konnten.

Zum Start drücken Sie den Hüpfer mit dem gekreuzten Gummiband auf der Unterseite flach auf einen glatten Tisch. Dann loslassen und schnell die Finger wegziehen, um die Bewegung nicht zu stören! Der Pappwinkel stellt sich schnell auf und hebt rascher ab, als das Auge folgen kann. Der Start dauert nur drei hundertstel Sekunden. Die zwei Pappen knallen hörbar zusammen und steigen wie ein Geschoss bis anderthalb Meter hoch. Sogar unsere Hochgeschwindigkeits-Videokamera, die dabei mit 200 Bildern in der Sekunde zuschauen durfte, war überfordert, konnte aber sichtbar machen, dass der Hüpfer abhebt, wenn er sich zu einem Dach von etwa 45 Grad aufgestellt hat. Das folgt auch aus der einfachsten Theorie. ◁

Wolfgang Bürger ist emeritierter Professor für Theoretische Mechanik an der Universität Karlsruhe.

Literaturhinweis

Erfinderin Natur. Von Werner Nachtigall. Rasch & Röhring, Hamburg 1988.

Der Mensch ist, was er isst

Das Gehirn wuchs in der menschlichen Evolution, als unsere Vorfahren begannen, kalorienreicher zu essen. Diese ererbte Vorliebe passt schlecht zur heutigen Lebensweise.

WEITERE THEMEN IM MAI

Die Erfahrung sieht mit

Bei vielen optischen Täuschungen registriert das Gehirn nicht so sehr die konkrete Gegenwart. Vielmehr gibt es dem Gesehenen eine gelernte Bedeutung.

Nano-Laufwerke

Neuartige Datenspeicher ritzen Informationen als »atomare Keilschrift« in Kunststoffkärtchen.

Ein Vierteljahrhundert Mathematik

Nach wie vor steht der strenge Beweis im höchsten Ansehen. Aber die Mathematik ist vielseitiger geworden: Das Arbeitsmittel Computer eröffnet völlig neue Perspektiven, und die Grenzen zwischen den Teildisziplinen verschwimmen.

Magnetare

Manche Neutronensterne haben derart starke Magnetfelder, dass sich auf ihnen höchst seltsame Ereignisse abspielen: Ihre Oberfläche reißt gelegentlich wie bei einem Erdbeben und setzt dabei gewaltige Energiemengen frei, die sogar die Quantenstruktur des Vakuums beeinflussen.

Die Komplexität von Kaffee

Hinter dem alltäglichen Getränk verbirgt sich ein Cocktail aus Hunderten chemischer Verbindungen. Die Gewinnung und Röstung der Bohnen, ja selbst das Aufbrühen steckt voller Finessen, die auf subtile Weise Geschmack, Aroma und Bekömmlichkeit von Kaffee beeinflussen.